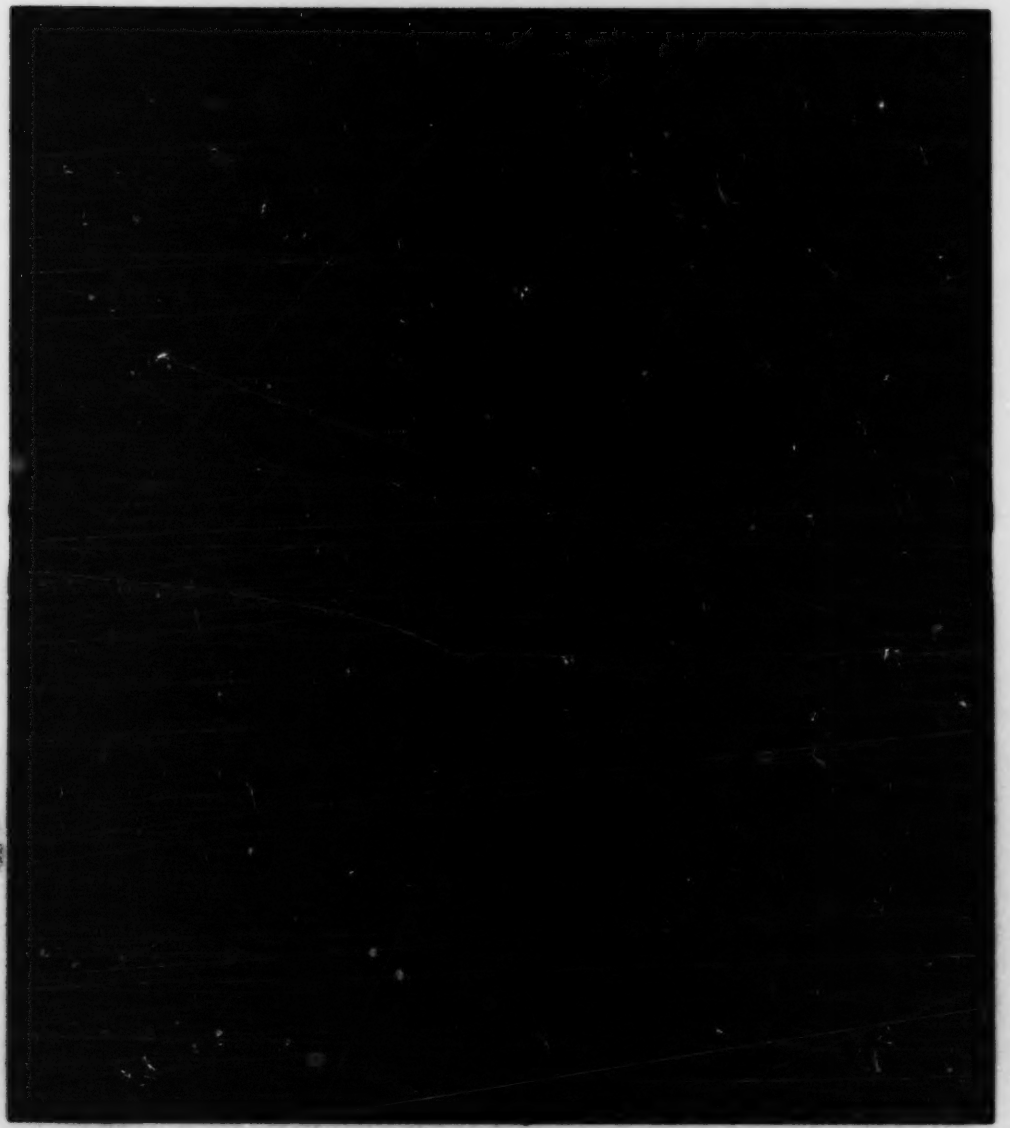
Énergie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada

LEVÉS DES TERRES DU CANADA AU LARGE DES CÔTES

POUR

L'EXPLOITATION DES RESSOURCES MINÉRALES

TROISIÈME ÉDITION DÉCEMBRE 1982



Publié par:
Direction des levés et de la cartographie

Canada

LEVÉ DES TERRES DU CANADA AU LARGE DES CÔTES pour l'exploitation des ressources minérales

Troisième édition

Rapport basé sur les conclusions des représentants du gouvernement et de l'industrie qui se sont réunis en ateliers entre 1970 et 1982 pour étudier les aspects techniques et juridiques de la prospection minérale des terres sous-marines du Canada.

Harold E. Jones, rédacteur en chef

Publié par:

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources
Direction des levés et de la cartographie
Ottawa, Canada

Décembre 1982

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1983

En vente au Canada par l'entremise de nos

agents libraires agréés
et autres librairies

ou par la poste au:

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa, Canada, K1A 0S9

N° de catalogue M52-43/1983F
ISBN 0-660-91145-0

Canada: 14.95 $
à l'étranger: 17.95 $

Prix sujet à changement sans avis préalable

N° de stock — Bureau des cartes du Canada SMP-1274F

Photographies

Couverture — gracieuseté de Dome Petroleum Ltd.
Figure 4 — gracieuseté de Mobil Oil Canada Ltd.
Figure 5 — gracieuseté de Lockheed Offshore Petroleum Service
Figures 13 et 14 — gracieuseté de *Offshore Magazine*
Figures 50 et 51 — gracieuseté de Geophysical Service Inc.

Organisations représentées au sein de
l'Atelier de 1982 sur le levé des fonds marins
qui parraine la production de la présente publication

INDUSTRIE

Association pétrolière du Canada (Comité des levés et de la cartographie)
Independent Petroleum Association of Canada
Petro-Canada
The British Petroleum Company Ltd. (Londres)
Canadian Association of Hydrographic and Ocean Surveying Industries

GOUVERNEMENT

Province du Nouveau-Brunswick (Ministère des Ressources naturelles)
Conseil des premiers ministres des Maritimes (Service du cadastre et de l'information foncière)
Commission de la frontière internationale (C.F.I.)
Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada
Ministère des Affaires indiennes et du Nord (M.A.I.N.) (Division du pétrole et du gaz)
Ministère des Transports (Garde côtière canadienne)
Ministère des Pêches et des Océans (Service hydrographique du Canada)
Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (E.M.R.) (Division des levés géodésiques et Division des levés officiels)

Les opinions exprimées par les spécialistes dans leur domaine de compétence respectif ne sont pas nécessairement partagées par les organisations participantes.

COMITÉ DE RÉDACTION

H.E. Jones, Président, Division des levés officiels, E.M.R.
D.H. Gray, Service hydrographique du Canada, Pêches et Océans
S.A. Kanik, Division du pétrole et du gaz, M.A.I.N.
D.K.F. Dawson, Association pétrolière du Canada
J.A. Merkley, Association pétrolière du Canada
H.E. Valin, réviseur, Direction des levés et de la cartographie, E.M.R.

Avant-propos

L'augmentation de la demande d'énergie de la part de tous les secteurs de l'économie canadienne a engendré une expansion de l'exploration pétrolière et gazière. Étant donné l'urgence et l'ampleur de la prospection des régions pionnières du Canada, il devient de plus en plus impérieux d'exécuter et de réglementer les levés des terres sous-marines.

Depuis 1970, les gouvernements et l'industrie se sont réunis en atelier à plusieurs reprises afin d'étudier les règlements, les techniques et les procédures applicables à l'exploitation des ressources sous-marines. Cette collaboration s'est avérée très fructueuse pour toutes les parties en cause et d'autres ateliers sont prévus. La dernière rencontre a eu lieu du 15 au 19 mars 1982, et c'est en cette occasion qu'a été recommandée la publication de cette troisième édition.

A titre de président du Comité de coordination interministériel pour le levé des fonds marins, je suis heureux d'en approuver la publication. Je désire remercier tous les participants de l'Atelier qui, par leurs discussions, ont fourni la matière du présent rapport, ainsi que le comité de rédaction qui a mis la dernière main aux travaux. J'espère que les renseignements qui suivent seront utiles à tous ceux qui participent aux levés des fonds marins et qu'ils leur permettront de cerner les nombreux problèmes techniques, administratifs et juridiques qui se posent dans cette sphère d'activités.

R.E. Moore

Table des matières

Page

Introduction 1

Chapitre 1 — La prospection minérale en mer
- Techniques de forage en eaux profondes 3
- Complètement sous-marin 7
- Marge continentale du Canada 8
- Droit de la mer 8
- Levés successifs précédant le forage 12

Chapitre 2 — La gestion des ressources des terres sous-marines du Canada
- Travaux d'exploration 17
- Réglementation des activités pétrolières et gazières .. 18

Chapitre 3 — La gestion des levés en mer
- Limites et repères 19
- Repères et points de référence 22
- Systèmes de positionnement 22
- Détermination de la position d'un puits 22
- Relevés de sondage 23
- Repères et complétions sous-marines 24
- Rapports sur le positionnement des puits d'exploration 25
- Compétence des arpenteurs du Canada 25
- Levés officiels 25
- Frontières et lignes de démarcation internationales ... 25

Chapitre 4 — Les canevas géodésiques
- Stations côtières 27
- Base nationale de données géodésiques 27
- Compensation scientifique des canevas géodésiques .. 27
- Spécifications relatives à la précision 27

Chapitre 5 — Les systèmes de références géodésiques
- Système terrestre classique 31
- Latitude et longitude astronomiques et hauteur au-dessus du géoïde 31
- Systèmes ellipsoïdaux 31
- Réalisation des divers systèmes de références 32
- Transformations sur des surfaces de références 33
- Surface de référence nord-américaine de 1927 (NAD 27) 34
- Projet NAD 83 34
- Déplacement local de la surface de référence 35

Chapitre 6 — Le positionnement au large des côtes
- Zones 37
- Précision et fidélité 37
- Précisions des mesures 37
- Exactitude de la position 38

Chapitre 7 — Les systèmes terrestres de positionnement par radio
- Classification 41

Page

- Modes de fonctionnement 41
- Modes de transmission 44
- Propagation des ondes radio-électriques 44
- Calcul des déphasages primaires et secondaires 51
- Précision du positionnement par radio 54
- Traitement des données 59
- Logistique nécessaire à la mise en oeuvre de ces systèmes 59
- Les systèmes publics de navigation 60
- Description des systèmes — Micro-ondes, Ultra-hautes fréquences, Moyennes fréquences, BF, TBF 63

Chapitre 8 — Le positionnement par satellite et les systèmes inertiels
- Système Transit 71
- Système NAVSTAR/GPS 71
- Systèmes de positionnement inertiels 72

Chapitre 9 — Les autres systèmes et les systèmes intégrés
- Systèmes astronomiques 73
- Systèmes photogrammétriques 73
- Systèmes de positionnement acoustique 73
- Systèmes de navigation sonar-Doppler 74
- Systèmes intégrés 74

Chapitre 10 — Les levés hydrographiques
- Planification 77
- L'échosondeur 78
- Sondages 82
- Marées et niveaux d'eau 82
- Marées dans les eaux canadiennes 86

Chapitre 11 — Les levés géophysiques
- Introduction 97
- Méthodes basées sur le champ potentiel 97
- Levés sismiques 98
- Profileur de sous-sol marin, sonar latéral 100
- Levés par sismique-réflexion 3D 103

Chapitre 12 — Les glaces de mer et les levés au large des côtes
- Les glaces dans la Baie d'Hudson 107
- Les glaces dans le Détroit d'Hudson 107
- Les glaces sur la côte du Labrador 107
- Les glaces sur la côte est de Terre-Neuve 110
- Les glaces sur la côte sud de Terre-Neuve 110
- Icebergs 110
- Affouillement des glaces 112
- Règlements sur la navigation dans l'Arctique 112
- Brise-glaces 113
- Plates-formes de forage des glaces 114

Table des matières (suite)

Appendices

	Page
Appendice A — Levés en mer dans l'industrie pétrolière à l'extérieur de l'Amérique du Nord	115
Appendice B — Position de la Garde côtière canadienne sur les aides à la navigation requises dans l'Arctique	121
Appendice C — Nations Unies — Troisième conférence sur le droit de la mer, (Août 1981) Partie VI — Plateau continental	123
Appendice D — Déplacements locaux de la surface de référence NAD 27	127
Appendice E — Spécifications relatives aux rapports de positionnement des puits de sondage au large des côtes (réimpression d'une publication préparée par l'Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada)	135
Appendice F — Documents et cartes publiés par le gouvernement	139
Appendice G — Repères au large des côtes	147
Appendice H — Lignes directrices concernant les relevés de pipelines sous-marins	153
Appendice I — Bibliographie	155

Illustrations

Figure	Chapitre 1	Page
1	Distribution de puits canadiens forés au large des côtes jusqu'en 1981	4
2	Dépenses annuelles approximatives affectées par l'industrie à la recherche de pétrole et de gaz au large des côtes du Canada, 1963-1981	5
3	Nombre de puits forés au large des côtes du Canada 1966-1981	5
4	Plate-forme de forage semi-submersible typique au large des côtes, Sedneth 701, construite pour Nederlandse Zeeboormaatschappij (Sea Drilling Netherlands) B.V.	6
5	Un système de complètement sous-marin mis au point au Canada par Lockheed Offshore Petroleum Service	7
6	Marge continentale du Canada	9
7	Coupe schématique de la marge continentale	10
8	Permis octroyés pour l'exploration du pétrole et du gaz au large des côtes du Canada, 1974	11
9	Schéma caractéristique d'une île artificielle constituée uniquement de sable	14
10	Schéma caractéristique d'une île artificielle constituée d'un caisson reposant sur une assise de sable	14

Illustrations (suite)

Page

Chapitre 3

11 Discordances dans le système de référence de 1927 20
12 Écarts de positions entre le quadrillage géographique NAD 27 et le quadrillage géographique NAD 83 21
13 Système d'exploitation d'un gisement au moyen d'un réseau de complètement émergé 23
14 Système d'exploitation d'un gisement au moyen d'un réseau de complètement immergé 24

Chapitre 5

15 Relation entre le système terrestre classique et la latitude et longitude astronomiques 31
16 Relation entre le système terrestre classique et le système de référence ellipsoïdal 32
17 Rapport du géoïde au système ellipsoïdal 33

Chapitre 6

18 Précision de positionnement d'un système type de navigation à deux distances 39

Chapitre 7

19 Bandes de fréquence employées en navigation 41
20 Propagation des ondes radio 45
21 Intensité des signaux en fonction de la distance 45
22 Variation de la conductivité de la surface de la mer au large de la côte est du Canada 49
23 Composantes du déphasage 51
24 Intersection de lignes de position formant un triplet hyperbolique 54
25 Intersection de lignes de position d'une paire du système distance-distance 54
26 Courbes de la dilution géométrique de la position (DGP) pour une chaîne hyperbolique 56
27 Courbes de la dilution géométrique de la position (DGP) pour une chaîne en mode distance-distance 56
28 Un réseau d'ellipses de positionnement pour une chaîne en mode distance-distance 57
29 Chaînes de navigation Loran-C en Amérique du Nord 61

Chapitre 10

30 Lobes transducteurs de l'échosondeur 78
31 Variation du pourcentage du fond marin couvert en fonction de la profondeur et de la largeur du faisceau du transducteur de 30° et de l'intervalle des lignes de 100 m 79
32 Erreurs de profondeur de la sonde dues à la pente du fond marin 80
33 Effet hyperbolique causé par la sonde 81
34 Procédure d'étalonnage du sondeur 82
35 Enregistrement typique de la vérification manuelle 83
36 Plans de référence et variations des niveaux de l'eau dans des eaux à marée 84
37 Plan de référence et niveaux de l'eau le long d'une côte ouverte 85
38 Carte de lignes cotidales semi-diurnes 86
39 Construction d'une carte de lignes cotidales 87
40 Classification des marées canadiennes 89
41 La progression moyenne des marées semi-diurnes dans le Golfe du Saint-Laurent et au large des côtes de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Écosse 90

Illustrations (suite)

		Page
42	La progression moyenne des marées diurnes dans le Golfe du Saint-Laurent et au large des côtes de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Écosse	91
43	La progression moyenne des marées dans le Détroit d'Hudson et la Baie d'Hudson	92
44	La progression moyenne des marées de Terre-Neuve à la Baie de Baffin	93
45	La progression moyenne des marées semi-diurnes sur la côte pacifique	94
46	La progression moyenne des marées diurnes sur la côte pacifique	95
	Chapitre 11	
47	Schéma caractéristique d'une ligne de tir employée pour les levés sismiques	99
48	Navire hydrographique, câble de remorquage, fish et organes de détection du sonar latéral	103
49	Espace tridimensionnel de données analogues aux données informatisées par sismique-réflexion 3-D	104
50	Sections isotemporelles caractéristiques, espacées à toutes les 4 msec, obtenues à partir des levés par sismique-réflexion 3-D	105
51	Courbes dessinées pour chaque section isotemporelle obtenues à partir des levés par sismique-réflexion 3-D	105
	Chapitre 12	
52a)	Étendue moyenne de la glace de mer le long des côtes du Labrador et de Terre-Neuve 1964-1979 (Décembre — mars)	108
52b)	Étendue moyenne de la glace de mer le long des côtes du Labrador et de Terre-Neuve, 1964-1979 (Avril —juillet)	109
53	Limites extrêmes et moyennes des icebergs au large de la côte de Terre-Neuve, 1959-1975	111
54	Zones de contrôle de la sécurité de la navigation des eaux de l'Arctique (au nord de 60°)	113
	Appendice D	
D-1	Composante X du déplacement local de la surface de référence	130
D-2	Composante Y du déplacement local de la surface de référence	131
D-3	Composante Z du déplacement local de la surface de référence	132
D-4	Hauteur du géoïde par rapport à l'ellipsoïde du NAD 27	133
	Appendice E	
E-1	Plan type de localisation d'un puits de sondage au large des côtes	138
	Appendice F	
F-1	Index des cartes bathymétriques générales des Océans (Cinquième édition)	145
	Appendice G	
G-1	Types de bouées d'amarrage	148
G-2	Variation du rayon d'action de la bouée par rapport à la profondeur de l'eau et des différentes lignes d'amarrage	148
G-3	Types de réflecteurs acoustiques	151

Introduction

C'est à la fin des années 1960 que l'industrie du pétrole et du gaz a vraiment commencé à forer des puits d'exploration sur les marges continentales du Canada. Comme les puits étaient forés loin de la terre ferme et que les méthodes et les règlements de prospection avaient été conçus pour des travaux terrestres, ceux qui s'intéressaient directement à l'exploitation minérale en mer se rendirent compte qu'il était nécessaire de faire appel à de nouvelles techniques pour déterminer avec précision des positions en mer et fixer l'emplacement des puits au large des côtes. Ces nouvelles techniques étaient particulièrement importantes au large de la côte est, où la marge continentale s'étend par endroit sur plus de 1000 km.

En 1969, suite à des initiatives de la Shell Canada Limitée et de la Direction de la gestion et de la conservation des ressources (ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources), des réunions furent organisées entre l'industrie et le gouvernement sous le parrainage de l'arpenteur général de l'E.M.R. On se pencha sur les problèmes techniques et administratifs que posent les levés en mer et l'on tenta de découvrir des moyens de les résoudre. L'un de ces moyens fut la création du Comité interministériel de coordination pour le levé des fonds marins qui fut placé sous la présidence du directeur général de la Direction des levés et de la cartographie de l'E.M.R. On organisa en outre un atelier d'une durée de six semaines, l'Atelier sur le levé des fonds marins, composé de 20 membres provenant de divers organismes de l'industrie et du gouvernement.

L'Atelier se réunit du 12 janvier au 20 février 1970 sous le parrainage de la Direction des levés et de la cartographie. Il avait pour mandat d'étudier des méthodes de levé et des règlements appropriés, de recommander des systèmes et des directives acceptables et de proposer des modifications pour que les règlements puissent également s'appliquer à la mise en valeur des ressources minérales sous-marines. L'Atelier décida de limiter son mandat à 3 tâches précises: premièrement, étudier les possibilités des systèmes de positionnement utilisables sur les marges continentales du Canada; deuxièmement, envisager le problème du bornage des positions relevées en mer; troisièmement, examiner, à la lumière des résultats obtenus, la réglementation en vigueur dans le domaine des levés. De plus, l'Atelier axa ses travaux sur la prospection pétrolière et gazière. A cette époque, on admettait la possibilité à long terme d'exploiter d'autres minéraux dans les terres sous-marines du Canada, mais aucun travail d'exploration n'avait encore été mené en ce sens, pas plus que dans les autres régions du globe. L'Atelier recommanda essentiellement l'amélioration du contrôle le long des côtes, des études techniques et des recherches sur plusieurs méthodes de levé (notamment la navigation par satellite), des modifications aux règlements en vigueur et des changements aux qualités exigées des arpenteurs-géomètres fédéraux. C'est sur le rapport de l'Atelier que fut basée essentiellement la première édition du *Surveying Offshore Canada Lands for Mineral Resources Development*, publiée en 1970.

Au cours des années qui suivirent, des groupes d'étude de l'Atelier se réunirent pour faire le point sur la recherche, l'état de la législation et le perfectionnement des systèmes de levé. D'autres recommandations furent formulées. C'est ainsi que fut publiée une deuxième édition du rapport en octobre 1975.

Depuis, d'importantes découvertes ont eu lieu dans l'Arctique et au large de la côte est. Conformément aux recommandations du premier Atelier, les qualités exigées des arpenteurs-géomètres fédéraux ont été élargies; c'est ainsi que le nouveau programme de formation menant à l'obtention d'un brevet d'arpenteur du Canada comprend désormais les levés hydrographiques et d'autres domaines qui interviennent dans les levés des fonds marins. Une nouvelle Loi sur le pétrole et le gaz du Canada a été proclamée. Les techniques de levé en mer ont changé considérablement, l'emploi des satellites étant devenu monnaie courante. Au cours de cette période, les Nations Unies ont adopté un projet de convention sur le droit de la mer qui donne des définitions internationalement reconnues des limites de la juridiction des États riverains. Afin de faire le point sur ces derniers événements et de formuler d'autres recommandations, 25 délégués du gouvernement et de l'industrie se sont réunis du le 15 au 19 mars 1982, dans un atelier parrainé par le Comité interministériel de coordination pour le levé des fonds marins. Cet Atelier a recommandé la production de cette troisième édition du rapport qui constitue une mise à jour de l'édition précédente et qui attache beaucoup plus d'importance au milieu arctique. Cette troisième édition renferme une nouvelle partie dans laquelle on décrit les études successives qui aboutissent au forage de puits d'hydrocarbures en mer, ainsi que d'autres chapitres qui traitent du positionnement et des levés hydrographiques et géophysiques.

Chapitre 1

La prospection minérale en mer

De nos jours, dans plus de 100 pays, des centaines de sociétés explorent les marges continentales, et dans quelque cinquante pays, on produit ou on s'apprête à produire du pétrole et du gaz au large des côtes. La majeure partie des travaux de production en mer ont débuté au début des années 70. L'homme a foré jusqu'à maintenant au-delà de 30 000 puits sous-marins. Des puits d'exploration ont été forés dans 1 486 mètres d'eau au large de la côte du Labrador et une plate-forme de production est ancrée dans 335 mètres d'eau dans le U.S. Gulf. Ces exemples montrent à quel point la technologie a progressé.

Au Canada, les forages s'effectuent dans des eaux de plus en plus profondes et éloignées des côtes. Le record de profondeur a été établi en 1979 par le puits Blue H-28 de Texaco-Shell. Dans les régions arctiques du Canada, des îles artificielles servant de plates-formes de forage ont été construites dans 23 mètres d'eau dans la mer de Beaufort, tandis que des plates-formes de forage armées contre la glace ont été utilisées par plus de 550 mètres de profondeur entre les îles de l'Arctique.

Dans le monde, environ 28 millions de km^2 de fonds marins se trouvent à moins de 300 mètres de profondeur, soit la profondeur maximale des travaux de production sous-marine. De ce chiffre, 16 millions de km^2, soit un tiers de la superficie totale des zones d'intérêt de la partie continentale du globe, ont un potentiel en hydrocarbures mais seulement une faible partie de cet immense domaine marin a été exploitée jusqu'à maintenant. Toutefois, la quantité de pétrole produite dans le monde au large des côtes est voisine de 20 % de la production totale, et les réserves pétrolières sous-marines représentent maintenant plus de 20 % de l'ensemble des réserves mondiales. On prévoit que le tiers de la production mondiale de pétrole proviendra de la mer d'ici 1990. En mars 1975, le National Petroleum Council a estimé que 55 à 70 % des ressources mondiales en pétrole marin se trouvaient à moins de 200 mètres de profondeur, et 80 à 90 % d'entre elles gisaient à l'intérieur de la limite de 200 milles marins.

Pour choisir l'emplacement des puits d'exploration, on a recours à des méthodes de prospection géologique et géophysique et on utilise les renseignements tirés des puits qui ont été forés précédemment dans la même région. Ces méthodes de sélection comportent une bonne part d'interprétation et d'extrapolation de données. Le choix de l'emplacement d'un puits d'exploration est donc fondé sur des probabilités, et seulement quelques-uns des nombreux forages s'avèrent productifs.

En outre, dans la majorité des cas, les puits jugés productifs mettent au jour des réserves assez faibles. Les autres débouchent sur des gisements de pétrole et de gaz de plus en plus riches, mais les chances de succès diminuent proportionnellement. La taille des réservoirs, la profondeur, la distance de la côte, les conditions météorologiques, l'état de la mer et des glaces, tels sont les facteurs qui influent sur la rentabilité des forages, de l'exploitation des gisements sous-marins et du transport du pétrole et du gaz qui en proviennent. De plus, ce qui constituerait un bon gisement sur la terre ferme peut se révéler, au large des côtes, une entreprise non rentable. Les Figures 1, 2 et 3 démontrent la répartition des puits de forage au large des côtes, les dépenses occasionnées et le nombre de puits forés jusqu'en 1981.

Techniques de forage au large des côtes

Partout dans le monde, la mise en valeur des ressources minérales en mer progresse vers des eaux inexplorées et encore plus profondes. Grâce au perfectionnement des techniques et du matériel de forage, de complètement et de production, il est maintenant possible d'exploiter économiquement des gisements de pétrole et de gaz qui se trouvent à plus de 400 mètres de profondeur. Ce mouvement vers des eaux plus profondes et plus hostiles, comme celles que l'on rencontre au large des côtes canadiennes, a incité les sociétés d'exploration à construire des plates-formes de forage plus imposantes, plus lourdes, semi-submersibles, dont la partie immergée déplace un volume d'eau de l'ordre de 25 000 tonnes. La Figure 4 montre un des types de plate-forme de forage semi-submersible. Il en existe d'autres types qui, vus de haut, ont une forme triangulaire ou pentagonale. La plate-forme semi-submersible qui semble actuellement gagner la faveur des concepteurs permet d'effectuer des opérations à des profondeurs de 175 à 275 mètres; il en existe un ou deux modèles modifiés qui utilisent des câbles plutôt que des chaînes d'ancrage et qui portent à 1 000 mètres la profondeur des forages. Quelques-uns des plus récents modèles, comme le Sedco 709, sont équipés du positionnement dynamique. Lorsque la mer est agitée, le semi-submersible est la plus stable des plates-formes de forage flottantes actuellement en service. Il existe aussi des plates-formes de forage en forme de navire (navires de forage), comme le Canmar Explorer III qui illustre la couverture du présent ouvrage.

Au large de la côte ouest, il n'y a pas eu d'activités depuis 1969, année au cours de laquelle 14 puits avaient été forés au moyen du semi-submersible Sedco 135-F.

Au large de la côte est, les sociétés d'exploration ont utilisé plusieurs plates-formes semi-submersibles telles que les Sedco H, I, et J, les Sedco 706, 707 et 709, le Zapata Ugland et le Bow Drill I. Sur la marge continentale du Labrador, elles ont eu recours à plusieurs navires de forage, comme le Pelerin, le Sedco 445, le Pelican, le Glomar Atlantic, le Ben Ocean Lancer et le Discoverer Seven Seas; ce dernier, équipé du positionnement dynamique, détient toujours le record mondial de profondeur, à savoir 1 486 mètres. Dans le golfe du Saint-Laurent et au large de l'île de Sable, les sociétés ont mis en place des plates-formes auto-élévatrices, notamment les Salenergy II, Rowan Juneau, Gulflide et Zapata Scotian.

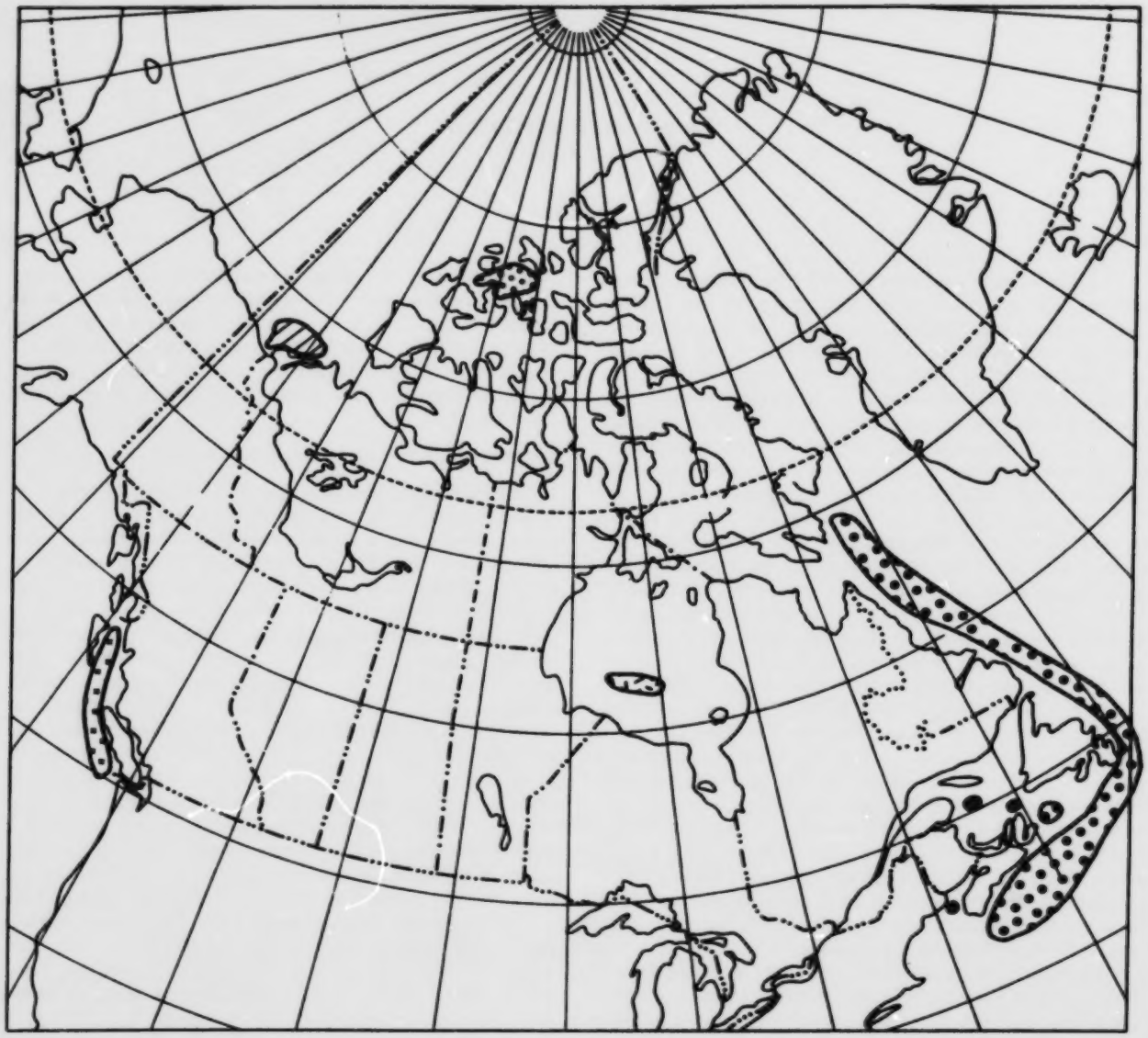


Figure 1
Distribution de puits canadiens forés au large des côtes jusqu'en 1981

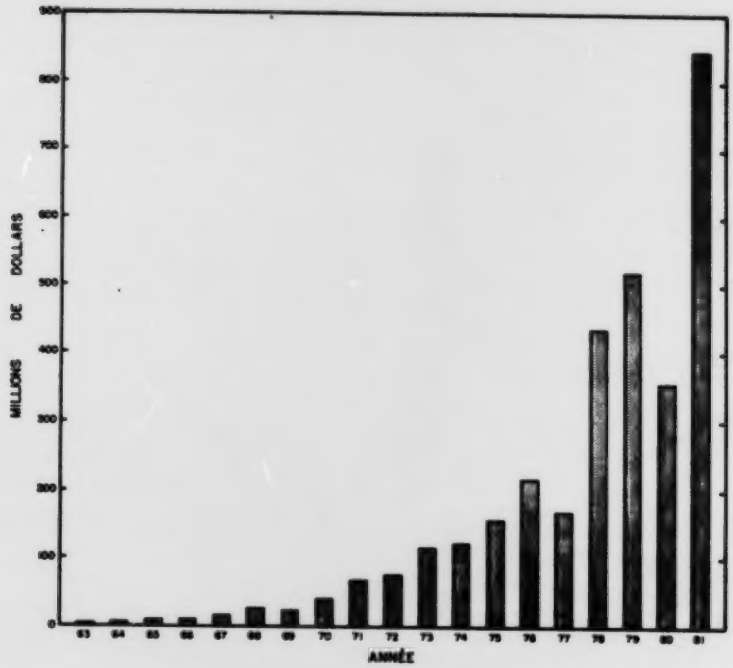


Figure 2
Dépenses annuelles approximatives affectées par l'industrie à la recherche de pétrole et de gaz au large des côtes du Canada, 1963-1981

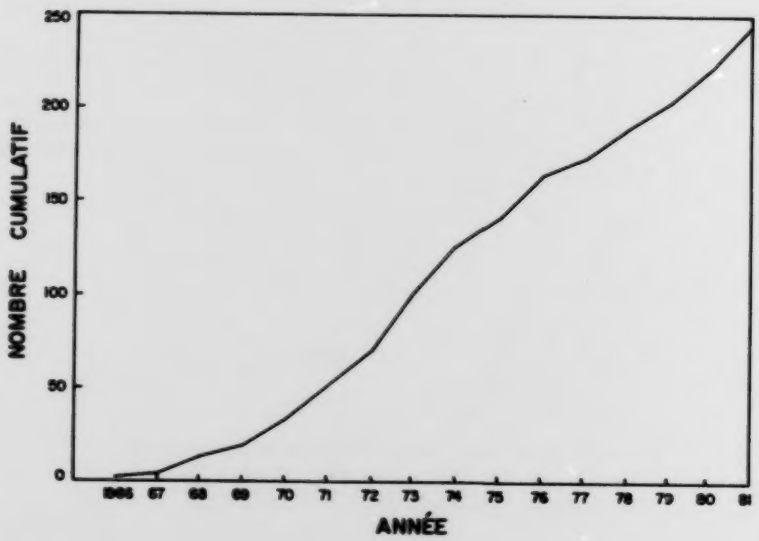


Figure 3
Nombre de puits forés au large des côtes du Canada 1966-1981

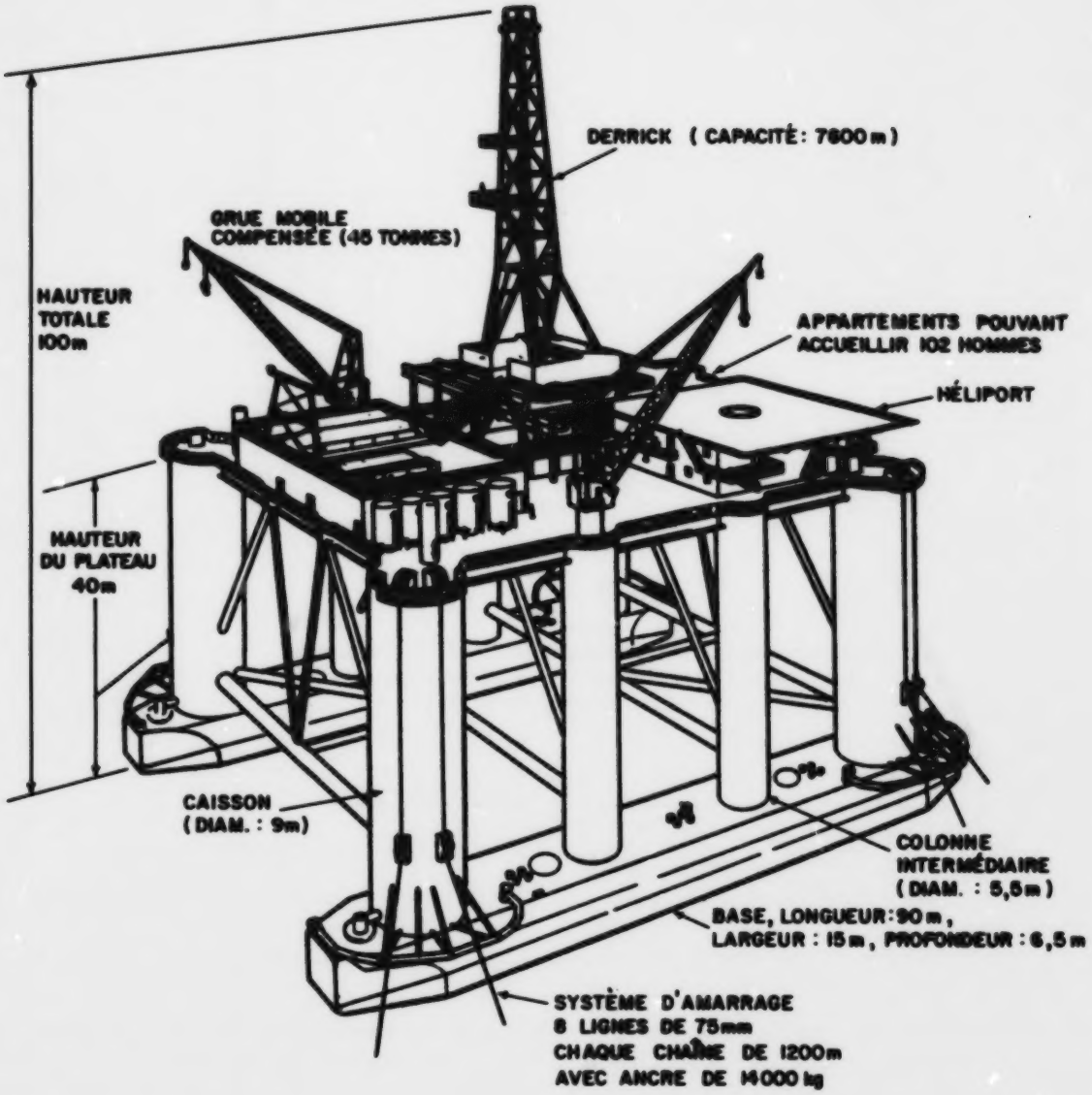


Figure 4
Plate-forme de forage semi-submersible typique au large des côtes, Sedneth 701, construite pour Nederlandse Zeeboormaatschappij (Sea Drilling Netherlands) B.V.

Dans la baie d'Hudson, les semi-submersibles Pentagone 82 et Wodeco II ont été mis en service en 1974.

Dans la mer de Beaufort, les navires de forage Canmar Explorer I, II, III et IV ont été mis à contribution.

Complètement sous-marin

Le déplacement des travaux d'exploration vers des eaux plus profondes ou des milieux plus hostiles, et l'accroissement des coûts des plates-formes fixes en proportion de la profondeur des eaux, ont eu pour effet d'accélérer la mise au point de méthodes de complètement et de production sous-marines (Figures 5 et 14). Ces systèmes sous-marins, comme celui qui a été mis au point au Canada par la Lockheed (Figure 5), permettent à des hommes de travailler à l'aise dans des capsules pressurisées qui reposent sur les fonds marins et d'appliquer les techniques normalement appliquées aux gisements terrestres pour compléter les puits et les relier aux centres de distribution et de production sous-marins. Deux ou trois systèmes de ce genre sont au stade de la mise au point et seront mis sur le marché sous peu. Ils peuvent aussi être employés dans des eaux peu profondes, lorsque la glace est une menace constante, lorsqu'il existe des couloirs maritimes ou pour toute autre raison.

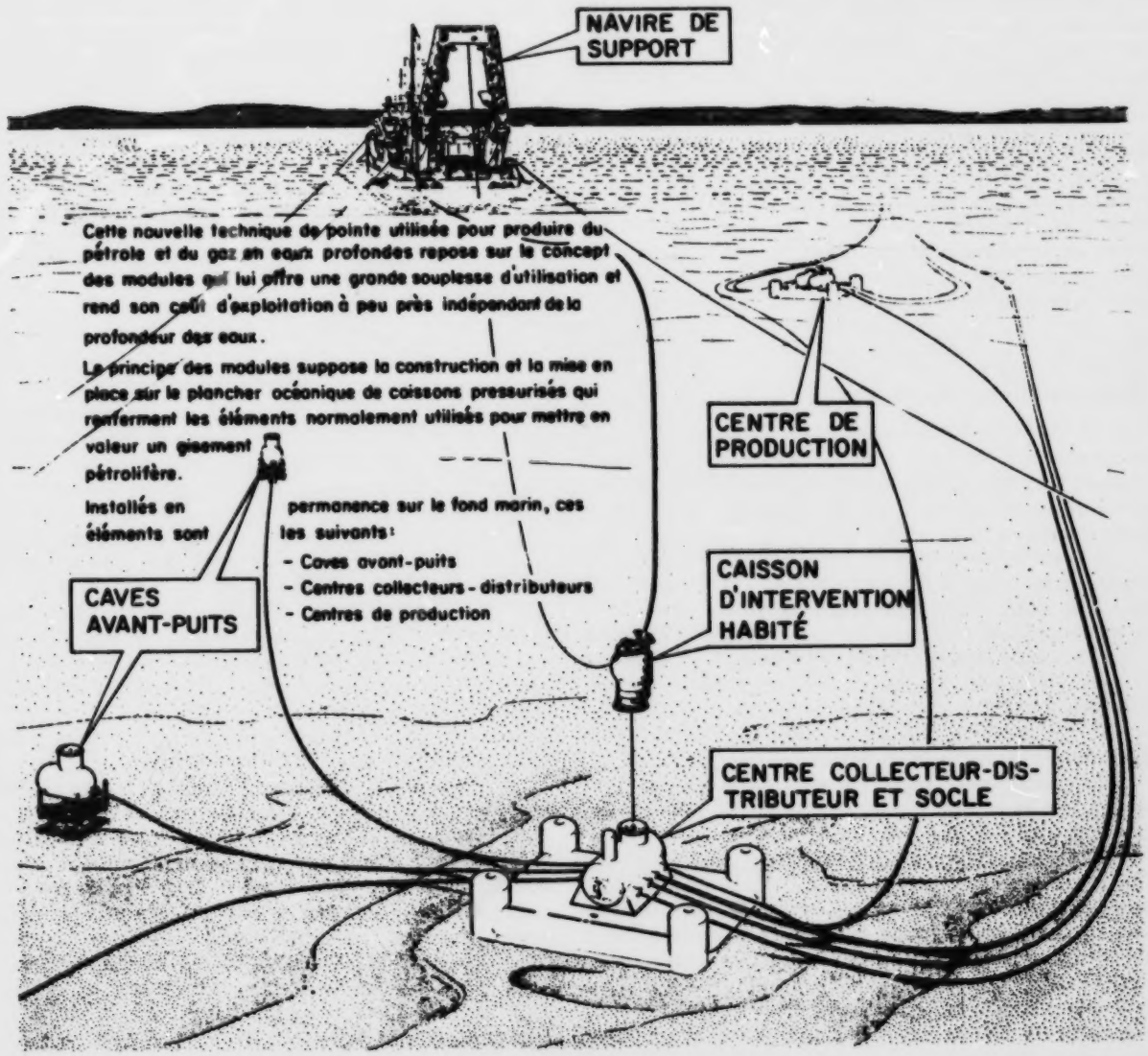


Figure 5
Un système de complètement sous-marin mis au point au Canada par Lockheed Offshore Petroleum Service

On construit actuellement des submersibles habités très perfectionnés, qui servent à la prospection géologique des fonds marins, au raccordement des têtes de puits sous-marines, à la vérification des pipelines, au sauvetage et à divers travaux de récupération en milieu marin. Ils pourraient aussi servir, dans les eaux libres de l'Arctique, à recueillir des données bathymétriques et sismiques quoique, dans les eaux du Grand Nord, l'endurance, la vitesse, la détermination des positions sous la glace et la logistique posent de nombreux problèmes techniques qui restent à résoudre.

Dans le cas des travaux sous-marins où une présence humaine n'est pas indispensable, on utilise normalement des submersibles télécommandés, qui se révèlent plus sûrs, moins onéreux, plus petits et plus simples à construire que les sous-marins habités. Ils sont équipés de bras télémanipulateurs, auxquels peuvent être fixés divers outils. Ils sont équipés de chambres de prise de vue et d'appareils de télévision sous-marins, ainsi que de dispositifs acoustiques; parmi les plus récents modèles, certains peuvent produire un travail utile à des profondeurs de 3 000 à 7 000 mètres.

Dans le cadre de la production pétrolière, d'énormes réservoirs sous-marins, en acier ou en béton, ont été mis en place sur les fonds marins à Dubai, dans le golfe Persique, et à certains puits de la mer du Nord, dont ceux d'Ekofisk et de Beryl. Ces structures massives, qui pèsent quelque 200 000 tonnes, reposent sur les fonds marins et sont maintenues en place par leur propre poids. De plus, comme elles émergent en partie, elles constituent en quelque sorte des îles artificielles.

Marge continentale du Canada

La marge continentale du Canada (Figure 6), prolongement immergé de la masse continentale du Canada, est, après celle de l'U.R.S.S., la plus étendue au monde. Elle comprend, en s'éloignant de la côte, le plateau continental, le talus et le glacis (Figure 7).

La marge continentale du Canada, la baie d'Hudson y compris, couvre plus de 6,5 millions de km^2, ce qui équivaut à plus de 60 % de la masse continentale canadienne. Par endroit, comme au sud-est de Terre-Neuve, elle s'étend sur plus de 1 000 km. Elle se répartit de la façon suivante: 2,5 millions km^2 au large de la côte est, 1 million de km^2 dans la baie et le détroit d'Hudson, 150 000 km^2 au large de la côte ouest, et 3 millions de km^2 dans la mer de Beaufort, l'archipel de l'Arctique et la région de la baie Baffin et du détroit de Davis.

Le plateau continental est la partie immergée d'un continent qui part de la côte et qui rejoint le talus continental suivant une pente moyenne inférieure à 1 degré. Dans le monde, la profondeur moyenne des eaux au bord du plateau continental est d'environ 130 mètres, mais le plateau canadien est généralement plus profond. Cela est particulièrement vrai au large de la côte est, où le plateau rejoint le talus à une profondeur de 400 à 500 mètres au nord des Grands Bancs, ainsi que dans l'extrême Arctique, où le plateau au large de l'archipel de l'Arctique prend fin à une profondeur d'environ 650 mètres. On attribue ce phénomène à la détente incomplète qui a succédé au retrait des glaces du Pléistocène.

Le talus continental du Canada a une déclivité moyenne de 3 ou 4 degrés et s'étend jusqu'à 2 000 à 4 000 mètres de profondeur. Le glacis continental plonge moins brusquement et s'étend de la base du talus continental jusqu'à la limite de la plaine abyssale, dont la profondeur varie entre 3 000 et 5 000 mètres.

Droit de la mer

Avant la troisième Conférence sur le Droit de la mer tenue récemment, la Convention sur le plateau continental adoptée à Genève en 1958 et ratifiée par le Canada en 1970 énonçait la loi internationale régissant les ressources sous-marines appartenant à un État côtier.

La Convention de Genève sur le plateau continental stipulait que l'État côtier "...exerce des droits souverains sur le plateau continental aux fins de son exploration et de l'exploitation de ses ressources naturelles." Elle définissait le plateau continental comme s'étendant "...jusqu'à une profondeur de 200 mètres ou, au-delà de cette limite, jusqu'au point où la profondeur des eaux surjacentes permet l'exploitation des ressources naturelles desdites régions...". Elle stipulait en outre que les droits souverains en question étaient "exclusifs" et "indépendants de l'occupation effective ou fictive, aussi bien que de toute proclamation expresse." Les limites des compétences nationales sur les ressources des fonds marins, en vertu de la Convention, étaient donc liées au progrès technologiques mondiaux.

Le Canada a fait valoir ses droits sur les minéraux du plateau continental juridique en délivrant et en administrant des permis d'exploration et d'exploitation pétrolières et gazières qui s'appliquent à de vastes étendues du plateau et du talus continentaux, et à certaines parties du glacis, en assurant la surveillance et la réglementation de toutes les activités orientées vers les ressources minérales de cette région (Figure 8), ainsi que par des déclarations au Parlement, aux Nations Unies et devant d'autres assemblées. Ses revendications trouvent un appui solide dans la décision de 1969 de la Cour internationale de justice dans l'affaire de la mer du Nord, ainsi que dans les pratiques des États.

Le fait que le Canada ait délivré des permis qui mettent en cause de vastes étendues des fonds marins ne contitue pas en soi une reconnaissance des droits du pays sur les ressources sous-marines. Une mesure unilatérale d'un État ne créée pas une loi internationale ni n'aboutit nécessairement à ce résultat. En général, une pratique doit être reconnue et adoptée par d'autres États avant de devenir une loi internationale.

La question des limites des compétences nationales sur les ressources sous-marines a pris une importance capitale aux Nations Unies au moment du dépôt de la résolution maltaise en 1967. Cette résolution énonçait l'intention des Nations Unies de réserver le sol et le sous-sol marins situés au-delà des limites actuelles des compétences nationales à des fins exclusivement pacifiques et à en exploiter les ressources dans l'intérêt de la race humaine. Le Comité des fonds marins des Nations Unies et, après 1973, la troisième conférence des Nations Unies sur le Droit de la mer se sont heurtés à une difficulté de taille: où devrait se situer la limite entre les ressources sous-marines qui sont de compétence nationale et les ressources sous-marines qui doivent être exploitées en vertu du régime international dans l'intérêt de tous. Le Canada s'est employé très activement à résoudre ce problème.

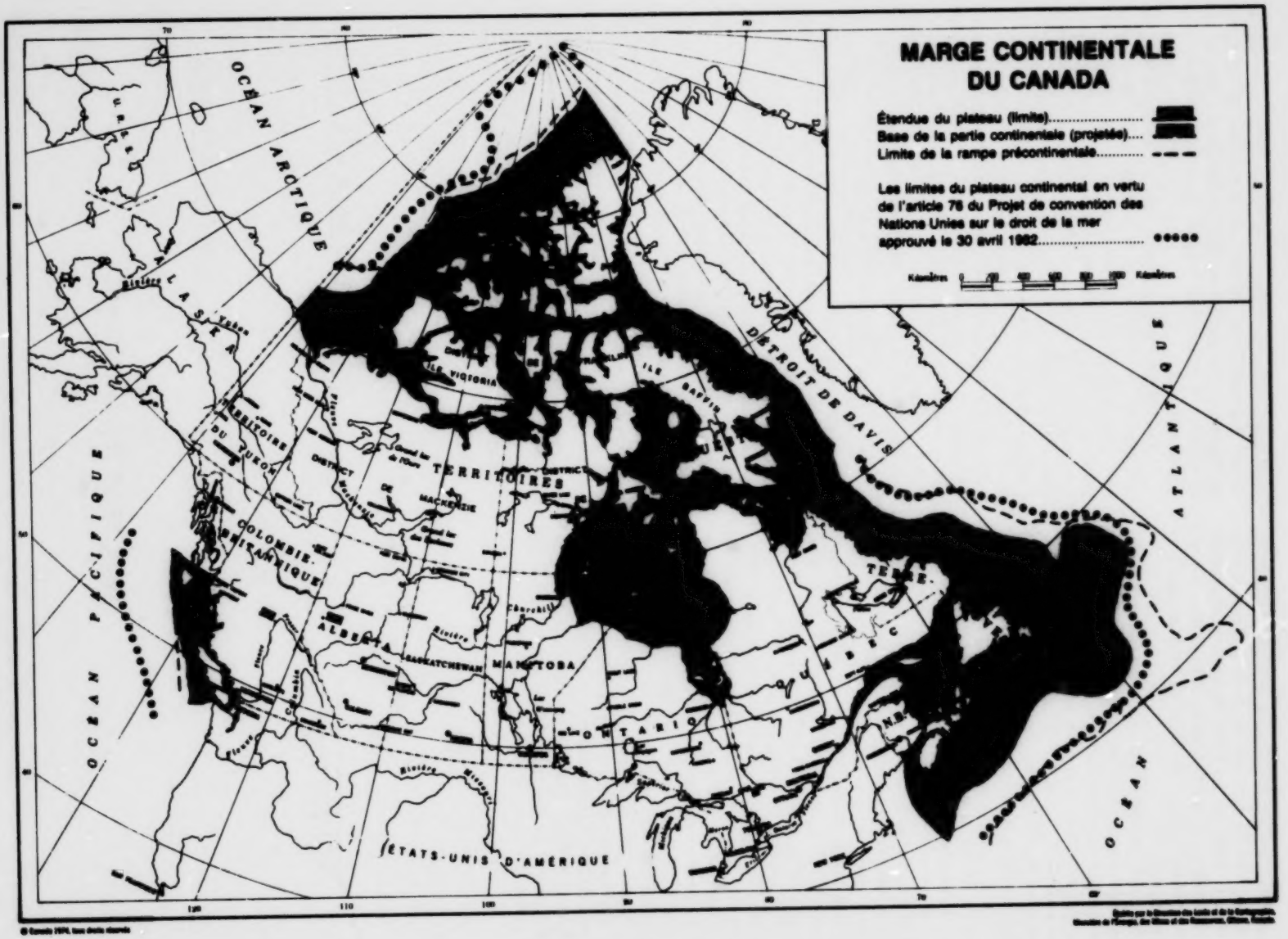


Figure 6
Marge continentale du Canada

Depuis 1967, le Canada a présenté sa position, auprès des représentants de tous les États, sur les droits et responsabilités des États côtiers. Selon lui, les États côtiers devraient exercer des droits souverains sur la recherche et l'exploitation des ressources sous-marines jusqu'à la limite de leurs marges continentales adjacentes.

En partie sous l'influence du Canada, des solutions basées sur l'extension des eaux territoriales ont été mises de l'avant par un nombre croissant de pays membres du Comité des fonds marins des Nations Unies et reprises plus tard au cours des nombreuses sessions de la troisième Conférence sur le Droit de la mer qui ont eu lieu d'abord à Caracas, puis à New York et Genève. Ces propositions étaient plus ou moins liées à la création d'une zone économique exclusive dont la largeur à partir de la côte serait de 200 milles marins et à l'intérieur de laquelle un État côtier pourrait exercer des droits exclusifs sur un éventail de ressources et d'activités. Cependant, l'idée d'une extension des eaux territoriales n'a pas reçu un appui universel et les pays membres ont dû faire des compromis pour intégrer une formule adéquate dans le projet de traité. La proposition a finalement été adoptée au cours de la dernière session de la Conférence tenue à New York en avril 1982. La partie VI du projet de convention (que nous reproduisons en appendice C) a pour objet le plateau continental. Elle englobe les articles 76 à 84.

L'essentiel de l'article 76 du projet de traité, qui décrit la façon dont un État côtier peut définir les limites extérieures de ses droits souverains sur les ressources sous-marines, a été imaginé par l'Irlande en collaboration avec le Canada. En termes simples, cet article reconnaît aux États côtiers des droits exclusifs jusqu'à une distance de la côte d'au moins 200 milles marins et, au-delà de cette distance, jusqu'à la limite extérieure de la marge continentale s'il peut être démontré que celle-ci s'étend au-delà de la limite de 200 milles marins. La limite extérieure de la marge continentale est définie selon des critères géomorphologiques et géologiques et fixée par des lignes de base droites reliant des points qui 1) sont situés à une distance maximale de 60 milles marins de la base du talus continental ou 2) se trouvent à un endroit où l'épaisseur de la roche sédimentaire sous-jacente au glacis continental n'est pas inférieure à 1 % de la distance qui les sépare de la base du talus continental.

Les restrictions ne s'arrêtent pas là. Les limites définies ci-dessus doivent se trouver en deçà de 350 milles marins de la côte, ou à la distance correspondant à la profondeur de 2 500 mètres plus 100 km, si la seconde est supérieure à la première. Le compromis auquel certains ont dû se soumettre pour faire accepter la formule de l'extension des eaux territoriales, c'est de s'engager à partager avec la communauté internationale les recettes découlant des ressources minérales produites dans la partie de la marge continentale située au-delà de la limite des 200 milles marins, jusqu'à concurrence de 7 % de la valeur des ressources à la tête du puits ou à la mine. Le Traité sur le droit de la mer n'est pas encore passé au rang de loi internationale; il doit être signé à Caracas en décembre 1982, après quoi chaque pays sera libre de le ratifier.

En vertu de l'article 76, chaque État côtier doit établir la limite extérieure de ses droits souverains en se conformant à des définitions et instructions précises lorsque sa marge continentale s'étend au-delà de la limite des 200 milles marins. La Figure 6 indique la position approximative de cette limite.

Outre la question générale de la limitation des droits des États sur les ressources des fonds marins, exigée par l'article 76, le Canada doit conclure des accords bilatéraux avec des pays voisins. Il s'agira essentiellement de délimiter, aux fins de l'exploitation de minéraux et d'autres ressources, les frontières marines entre le Canada et les États-Unis aux environs du golfe du Maine, du détroit Juan de Fuca, de l'entrée Dixon et de la mer de Beaufort. Il reste aussi à établir des lignes de démarcation dans le cas des îles françaises St-Pierre et Miquelon. La ligne de partage entre le territoire danois du Groenland et le Canada dans le détroit de Davis et la baie Baffin (Figure 8) a été établie par accord bilatéral en 1973. Des accords doivent également être négociés pour la section située au nord de 82°13' de latitude.

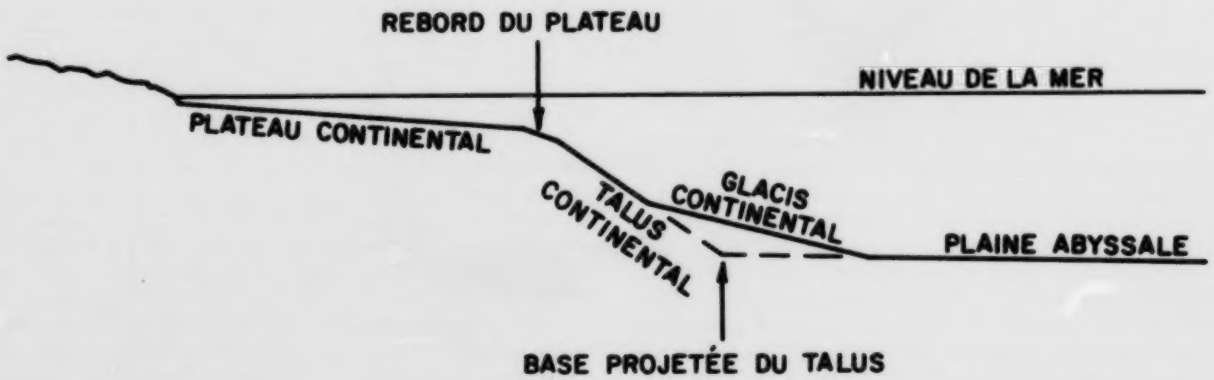


Figure 7
Coupe schématique de la marge continentale

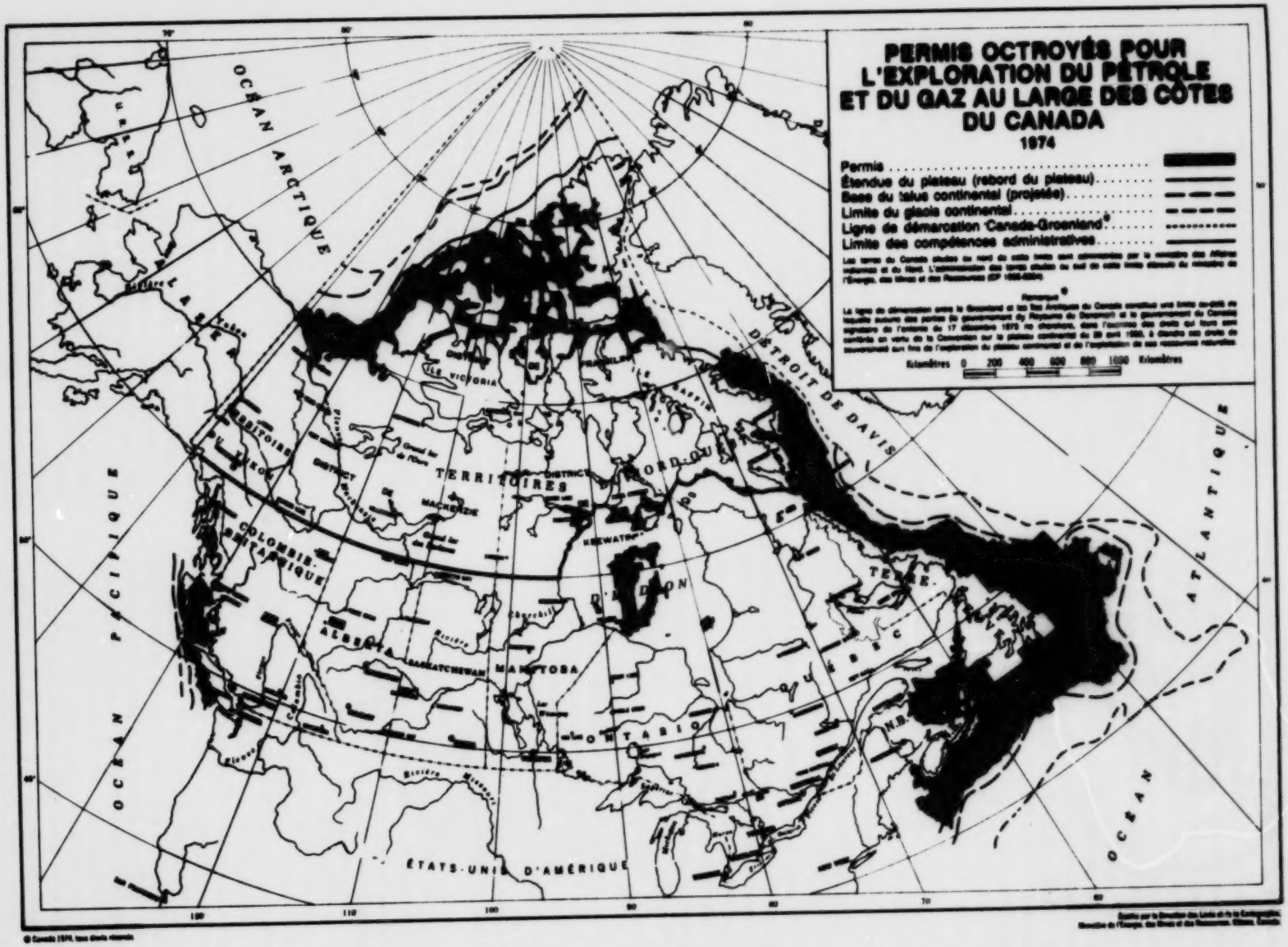


Figure 8
Permis octroyés pour l'exploration du pétrole et du gaz au large des côtes du Canada, 1974

Levés successifs précédant le forage

La prospection pétrolière et gazière des terres sous-marines du Canada exige que les positions géographiques soient connues à chaque instant. Cette exigence vaut également pour les travaux exécutés sur la terre ferme, sauf qu'en mer, il n'existe pas de repère fixe et qu'il faut compter entièrement sur des appareils électroniques pour obtenir des coordonnées géographiques numériques (positions) et rapporter le lieu de l'observateur à un système de référence constant. Selon l'article 9 du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada, ce système de référence doit être le système de référence nord-américain de 1927 (NAD27).

Les positions successives sont liées par des mesures de l'intervalle de temps et par les composantes de la vitesse du navire. En début d'exploration, aucun repère fixe de position n'est établi.

Voici un résumé des diverses étapes de la campagne de prospection sismique qui précède la production d'hydrocarbures en mer.

- Étude de reconnaissance générale — Emploi d'un navire de prospection sismique à grande profondeur

  L'objectif de cette étude préliminaire des sédiments sous-marins est de trouver des indicateurs qui pourraient révéler la présence de structures ou de dépôts. La disposition géométrique adoptée dans une campagne de prospection de ce genre dépend de plusieurs facteurs, notamment du budget et des données que l'on possède déjà au sujet de la région. L'écartement des lignes peut varier entre 5 et 10 km; en espaçant les hydrophones sur les flûtes en fonction de la vitesse de déplacement du navire, on arrive à un intervalle de tir ("pop" interval) qui, en général, est voisin de 25 mètres pendant toute la durée de la campagne. Un programme de dimensions moyennes peut comporter quelque 10 000 points de tir, dont chacun doit avoir une position distincte et constante.

- Étude sismique semi-détaillée — Emploi d'un navire de prospection sismique à grande profondeur

  Ce levé a pour but d'étudier de plus près les anomalies détectées au cours du levé de reconnaissance générale. Ces anomalies sont mesurées et relevées de manière à permettre au géologue d'estimer les possibilités d'existence de pièges d'hydrocarbures.

  Pour avoir une meilleure idée de la taille du réservoir, il faut réduire considérablement l'espacement des lignes. Un espacement de 500 m conviendrait sans modifier la configuration des flûtes. Ce levé fait lui aussi intervenir un grand nombre de points de tir et, comme on cherche à délimiter des lieux de forage probables, il faudra tôt ou tard retourner aux positions des points de tir jugés les plus propices. De là l'importance d'un système de levé précis. Le positionnement de l'engin de forage sera exécuté par la suite au moyen d'un système différent. Il ne doit pas y avoir d'erreur systématique susceptible d'entacher la précision de la mise en corrélation des positions.

- Étude des fonds marins — Emploi d'un navire de prospection sismique à faible profondeur

  Une fois qu'un détail géologique d'intérêt a été délimité sur une carte, l'étape suivante doit logiquement consister à forer un puits d'exploration; il est cependant nécessaire de procéder au préalable à une étude approfondie des fonds marins autour du puits projeté, afin de s'assurer que le sous-sol marin ne présente aucun danger, que l'ancrage ne pose pas de problème, et qu'il n'y a pas d'autres problèmes.

  L'article 89 (3) du Règlement sur le forage des puits de pétrole et de gaz au Canada exige que soit établi un pronostic qui fournit de l'information sur les conditions océanographiques, de même que sur la topographie et la composition des fonds marins. L'Appendice E de l'article 89 (3) énumère les facteurs bathymétriques, morphologiques, sédimentaires et biotiques ainsi que les risques à considérer avant de procéder au forage comme tel.

  Pour recueillir ces données, les entreprises doivent généralement employer un navire hydrographique équipé d'un échosondeur, d'un profileur de sous-sol marin, d'un sonar latéral, d'une chambre de prise de vues et d'un projecteur sous-marins, ainsi que d'une source sismique telle qu'un étinceleur ou un canon à air. Ce navire est habituellement plus petit que celui que l'on utilise en prospection sismique à grande profondeur. Le travail consiste à lever une série de lignes espacées d'environ 400 mètres. Il faut couvrir une surface d'au moins 2 km sur 2 km autour de l'emplacement du puits mais, en pratique, cette zone peut être beaucoup plus grande s'il y a plusieurs trous à forer.

- Localisation du puits d'exploration — Positionnement du navire de forage

  Objectifs

  La détermination de la position de l'engin de forage doit satisfaire deux conditions principales: 1) retrouver le point de tir qui, à la suite des levés géophysiques, a été reconnu comme le lieu le plus propice à un forage et 2) se conformer aux dispositions énoncées dans le Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada.

  Pour cela, il faut recourir aux services d'un ingénieur en arpentage qui connaît les défauts de précision inhérents au matériel ainsi que les sources et les genres d'erreur qui se commettent dans le positionnement à l'arrêt et en mouvement. On trouvera les compétences requises chez les titulaires du nouveau brevet d'arpenteur-géomètre du Canada.

  L'article 18 du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada exige que soit établi un plan provisoire qui définit le lieu prévu pour le forage et décrit la méthode et le système de localisation envisagés. Les articles 19 et 20 ont trait au levé de l'emplacement du puits comme tel. En vertu des paragraphes 19(1) et (4), le plan du levé doit indiquer l'emplacement arpenté d'un puits abandonné ou d'un puits dont l'exploitation a été interrompue, calculé par rapport à des stations géodésiques côtières. Il doit décrire les paramètres présumés du système de levé, ainsi que les repères des stations côtières. Si l'on découvre une accumulation de pétrole ou de gaz d'importance commerciale et que l'on décide de l'achever en vue d'une mise en production, l'article 20 prévoit qu'un plan de levé officiel aprouvé par l'Arpenteur général doit être soumis à l'Administrateur de l'Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada. Ce plan doit indiquer la position définitive officielle du puits par rapport aux limites des unités et des sections de l'étendue quadrillée dans laquelle il se trouve.

Dans le Règlement, le mot "achèvement" appliqué à un puits a un sens particulier. Il désigne non pas l'action de terminer les travaux, mais plutôt l'action de préparer le tubage du puits de manière à ce que la production puisse s'effectuer immédiatement ou plus tard. Sa définition exacte est donnée dans l'alinéa 2(2)b du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada. Les puits d'exploration sont rarement achevés. Lorsqu'un champ viable est découvert et délimité, les puits conçus spécialement pour la production, nommés puits d'extension, sont forés. Il faut alors, conformément à l'article 21, soumettre un plan d'arpentage officiel.

Procédures

Les engins de forage peuvent avoir diverses tailles et formes. Ils peuvent être équipés d'un système de propulsion autonome, à positionnement dynamique ou dépendre entièrement de bateaux auxiliaires pour leur déplacement. Certains sont carrément des navires; d'autres, vus de haut, présentent une forme triangulaire, rectangulaire, pentagonale ou autre. Ils peuvent reposer sur le fond de la mer (plates-formes autoélévatrices et submersibles) ou flotter (semi-submersibles et navires de forage).

La détermination du positionnement d'un engin de forage exige une technique compliquée, coûteuse et très perfectionnée. Ceux qui en sont responsables doivent non seulement connaître à fond les systèmes de positionnement qui existent, mais aussi comprendre clairement les fonctions et responsabilités des divers intervenants (chef des travaux de remorquage, arpenteur, chef du chantier de forage, superviseur des forages de la compagnie, etc.) et savoir évaluer convenablement l'état de la mer et les conditions météorologiques. Le plan d'approche nécessite une préparation soignée, mais doit conserver suffisamment de souplesse pour s'accommoder des variations possibles du temps et de l'éclairage entre autres. Étant donné que le coût du forage en mer peut dépasser un million de dollars par semaine, tout retard de la part de l'arpenteur-géomètre doit être parfaitement justifié. Le géologue indique au géomètre une zone cible à l'intérieur de laquelle l'engin de forage doit être positionné.

Ordinairement, le navire hydrographique indique la position du forage en mouillant des balises autour de l'emplacement approximatif, selon une disposition particulière. Ensuite, on amène l'engin de forage sur l'emplacement ainsi délimité, on jette l'ancre et on procède à un relevé en station fixe. Il est habituellement nécessaire de corriger la position de l'engin de forage, en faisant varier la tension de la chaîne d'ancrage, en activant les propulseurs ou en se servant du bateau auxiliaire.

Les centres radioélectriques du matériel de positionnement installé sur l'engin de forage, comme les récepteurs de signaux de satellite et les antennes de radionavigation (par exemple dans le Loran-C), sont rarement situés sur la verticale du puits de forage. C'est pourquoi la position du puits doit être réduite au centre radioélectrique par des mesures de la distance et de l'azimut de la ligne qui les joint. Lorsqu'il détermine cet azimut, l'arpenteur doit tenir compte du cap de la plate-forme de forage, en se conformant à la direction choisie au départ par l'exploitant. Tout ce travail a pour but de faciliter l'atterrissage des hélicoptères et le transbordement des marchandises.

- Puits de délimitation et étude sismique en trois dimensions (3D)

  Si le puits d'exploration débouche sur une accumulation de pétrole ou de gaz, l'exploitant doit évaluer l'étendue du réservoir. Pour circonscrire l'anomalie, il entreprend un levé sismique en trois dimensions, mais cette fois en augmentant considérablement la densité des lignes. Ce travail produit des données très concentrées, que l'on soumet à divers traitements pour préciser la taille et les caractéristiques du réservoir. Les lignes sont rapprochées (un espacement de 75 mètres n'est pas rare), et c'est pourquoi le levé doit avoir une très grande précision. Si l'évaluation des sismogrammes en trois dimensions indique que le réservoir pourrait être rentable, l'exploitant peut forer des puits de délimitation pour en confirmer les dimensions et la teneur.

- Positionnement des îles artificielles dans la mer de Beaufort

  Dans la mer de Beaufort, on construit fréquemment des îles artificielles qui constituent des plates-formes de forage stables et suffisamment solides pour résister à l'action de la banquise, des courants et des marées. La construction de ces structures fait appel à une technologie qui est encore en pleine évolution. C'est pourquoi il n'existe pas encore de règle rigoureuse ni de méthode rapide pour les édifier. Il n'existe pas non plus de norme régissant la classification des sols, la profondeur d'eau maximale ou les dimensions minimales des structures. Jusqu'ici, on a utilisé principalement deux types d'îles artificielles.

  — Îles constituées uniquement de sable
  Cette méthode consiste à extraire du sable en énormes quantités par dragage, à le transporter et à le déverser à l'endroit choisi, où la profondeur d'eau peut atteindre 20 mètres. La figure 9 montre une coupe de la structure ainsi obtenue.

  — Îles constituées de caissons reposant sur une assise de sable
  Cette fois, on utilise des caissons en acier ou en béton que l'on fait reposer sur une assise de sable et qui offrent le double avantage de réduire la quantité de sable nécessaire et d'écourter la période de construction. Les caissons peuvent être conçus de diverses manières mais, en règle générale, ils présentent une coupe analogue à celle qui est représentée dans la Figure 10.

  Pour certains aspects de ce travail, les principales qualités exigées d'un système de positionnement sont la fidélité et la commodité. Par exemple, il faut que le bateau-dragueur puisse retourner au même endroit avec efficacité et que le sable soit déversé en le moins de temps possible à des endroits précis. Dans d'autres cas, il faut mettre en corrélation des positions qui ont été déterminées par des systèmes différents, et ce qui importe surtout alors, c'est la précision. Par exemple, des systèmes différents pourraient être utilisés pour déterminer le lieu d'un forage, localiser une source de sable, étudier l'érosion des îles artificielles ou le mouvement de la glace sur le trajet des pipelines et localiser des pingos. L'arpenteur doit connaître les possibilités et les restrictions des divers systèmes de positionnement.

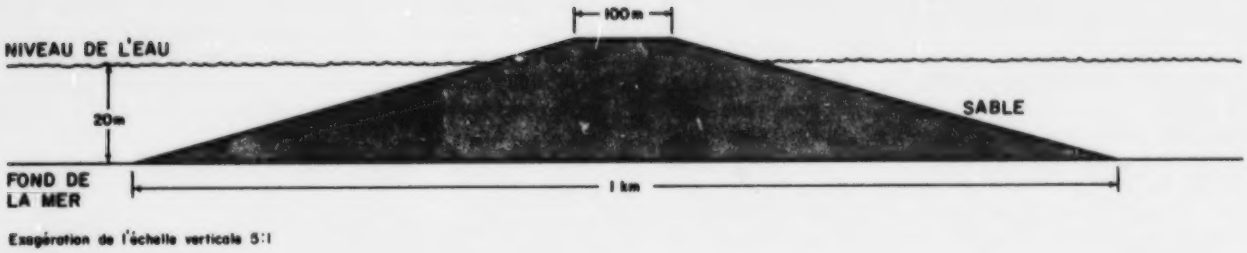


Figure 9
Schéma caractéristique d'une île artificielle constituée uniquement de sable

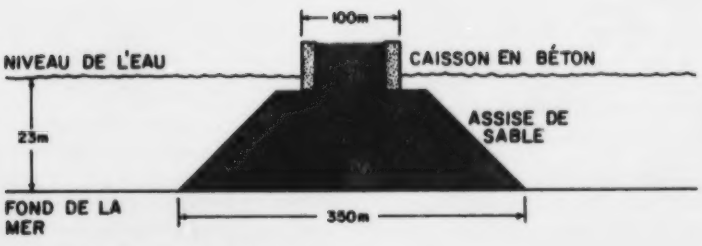


Figure 10
Schéma caractéristique d'une île artificielle constituée d'un caisson reposant sur une assise de sable

- Positionnement des pipelines

Il existe un projet de règlement qui pourvoit à la mise en place et à l'exploitation des pipelines sous-marins, mais il n'a pas encore été adopté. Il a été soumis à l'attention de plusieurs groupes du gouvernement et de l'industrie. Les parties de ce règlement qui ont trait aux levés gouvernent surtout l'approbation et la construction des pipelines et non pas les levés officiels. Dans l'intervalle, des directives non officielles pour les levés relatifs aux pipelines sous-marins ont été rédigées et elles sont données dans l'appendice H.

La détermination des positions est un travail indispensable à chaque étape de la construction d'un pipeline en mer. Qu'il s'agisse d'un levé de reconnaissance, du choix d'un tracé, de la mise en place d'un pipeline, de son entretien, du doublement d'un pipeline ou de l'accès à des produits, il faut être en mesure de retourner au même point. Les positions doivent être inscrites dans des documents publics et reportées avec précision sur des cartes hydrographiques. En outre, il est important de rapporter la position d'un pipeline à d'autres installations et à des éléments naturels et artificiels qui constituent un danger pour la navigation.

Sur terre, il est d'usage de protéger les pipelines au moyen d'une servitude, d'un droit de propriété inconditionnelle, d'une concession ou d'un autre mécanisme juridique basé sur une bande de terrain unique qui a fait l'objet d'un levé. En mer, il est difficile d'accorder ce genre de protection à une propriété située au-delà de la limite de la mer territoriale. Les accords conclus en vertu du Droit de la mer établiront la nature de la protection pouvant être accordée.

Chapitre 2

La gestion des ressources des terres sous-marines du Canada

Le ministre de l'Énergie, des Mines et des Ressources et le ministre des Affaires indiennes et du Nord partagent la responsabilité de la gestion des ressources non renouvelables sur les terres sous-marines du Canada en vertu de deux lois parlementaires communes (la *Loi sur le pétrole et le gaz du Canada* et la *Loi sur la production et la conservation du pétrole et du gaz*) et de leurs règlements d'application (Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada, Règlement concernant le forage des puits de pétrole et de gaz naturel au Canada et deux autres règlements à l'état de projet, à savoir le Règlement sur la production du pétrole et du gaz au Canada et le Règlement sur les oléoducs et les gazoducs du Canada). Les territoires sur lesquels les deux ministres exercent leur compétence sont divisés par une Limite de compétences administratives (voir la Figure 8). Pour que la gestion des terres sous-marines s'effectue avec cohérence et impartialité, les ministres ont créé l'Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada. Cet organisme est responsable devant l'un ou l'autre des ministres, selon que la gestion des ressources non renouvelables, y compris l'aliénation des droits, relève de l'une ou l'autre compétence.

La *Loi sur le pétrole et le gaz du Canada*, qui vient d'être adoptée, pourvoit à la gestion des droits sur le pétrole et le gaz en milieu marin. Elle autorise d'abord l'émission d'un accord d'exploration, qui accorde des droits d'exploration sur une étendue de terrain déterminée et le droit exclusif de demander une licence de production. Celle-ci confère à son titulaire le droit exclusif de produire et de vendre du pétrole et du gaz extraits dans une étendue de terrain déterminée. La Figure 8 indique les zones qui, en 1974, étaient visées par des permis d'exploration délivrés en vertu de l'ancien règlement. Sous le régime de la nouvelle loi, tous ces droits doivent faire l'objet de nouvelles négociations. Les limites exactes des concessions seront redéfinies mais, dans l'ensemble, les zones d'exploration resteront intactes.

La recherche du pétrole et du gaz peut également s'effectuer sous le régime d'une "licence d'opérations" délivrée en vertu de la *Loi sur la production et la conservation du pétrole et du gaz*. Cependant, étant donné que ce régime d'exploration ne confère aucun avantage exclusif, il est peu utilisé par l'industrie. La *Loi sur la production et la conservation du pétrole et du gaz* constitue le principal instrument de réglementation des activités de l'industrie.

La gestion des minéraux autres que le pétrole et le gaz relève du Règlement sur l'exploitation minière au Canada, qui a été établi en vertu de la *Loi sur les terres territoriales* et de la *Loi sur les concessions de terres publiques*. Les minéraux qui ressortissent au ministère des Affaires indiennes et du Nord sont gérés par la Division des mines du Programme des affaires du Nord, et ceux qui relèvent du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources sont gérés par l'Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada.

Travaux d'exploration

Depuis 1966, l'industrie a foré 243 puits en mer, dont 14 au large de la côte ouest, 3 dans la baie d'Hudson, 6 dans le golfe du Saint-Laurent, 1 dans la baie de Fundy, 155 au large de la côte est, 41 dans la mer de Beaufort (19 sur des navires de forage et 22 sur des îles artificielles) et 23 dans les îles de l'Arctique sur des plates-formes de glace.

L'industrie du pétrole et du gaz poursuit ses efforts de recherche et de développement en vue de mettre au point des techniques de production dans les eaux couvertes ou infestées de glace et dans les eaux fréquentées par des icebergs.

Voici une liste chronologique des forages réalisés au large des côtes canadiennes:

1966: Pan Am et Imperial forent deux puits sur les Grands Bancs.

1967: Mobil Oil Canada fore son premier puits dans l'île de Sable, et Shell Canada ses premiers au large de la côte ouest.

1968: Shell poursuit son programme de forage au large de la côte ouest.

1969: Shell réalise des forages au large des côtes est et ouest. Aquitaine explore la baie d'Hudson.

1970: Shell poursuit le forage sur le plateau de la Nouvelle-Écosse. Hudson's Bay Oil and Gas fore deux puits dans le golfe du Saint-Laurent.

1971: Shell poursuit le forage et Mobil commence sur le plateau de la Nouvelle-Écosse. Amoco et Imperial entreprennent un programme de forage intensif sur les Grands Bancs. Tenneco et ses partenaires forent un puits sur le plateau du Labrador et Elf Oil en fore un sur les Grands Bancs.

1972: Shell, Amoco-Imperial et Mobil poursuivent le forage au large de la côte est.

1973: Shell, le consortium Amoco-Imperial-Skelly et le consortium Mobil-Gulf continuent à forer au large de la côte est. Eastcan et ses partenaires forent des puits sur le plateau du Labrador, et Elf Oil entreprend des travaux au large de la côte est. Dans la mer de Beaufort, le premier puits, Immerk B-45, est foré sur une île artificielle dans 3 mètres d'eau.

1974: Shell, Amoco et autres ainsi que Mobil et autres forent au large de la côte est. Les travaux se poursuivent: Union et Texaco sur le plateau de la Nouvelle-Écosse, Eastcan et autres ainsi que BP Canada et autres dans la mer du Labrador, et Aquitaine et autres dans la baie d'Hudson. Panarctic fore aussi un premier puits, sur une plate-forme de glace renforcée, au large de l'île Melville.

1975: Mobil et ses partenaires poursuivent le forage au large de la côte est. Eastcan et autres ainsi que BP et autres reprennent le forage dans la mer du Labrador. Dome

Petroleum installe des silos en prévision des travaux de l'année suivante dans la mer de Beaufort.

1976: Dome entreprend des travaux à bord de navires de forage dans la mer de Beaufort.

1978: La première complétion sous-marine est réalisée dans les îles de l'Arctique, au puits Drake F-76.

1979: Les gisements Whitefish, Venture Hibernia et Koponar sont découverts. Le Discoverer Seven Seas fore le puits Blue H-28 et établit un record mondial de profondeur, à 1 486 mètres.

1980: Les gisements Tarsiut, Char, Balaena et Hekja sont découverts. Le forage se poursuit l'année durant sur les Grands Bancs.

1981: La première île artificielle à caissons est construite dans la mer de Beaufort. Les gisements Cisco, Skate et Maclean sont découverts dans les îles de l'Arctique.

Réglementation des activités pétrolières et gazières

La *Loi sur la production et la conservation du pétrole et du gaz* réglemente tous les aspects des activités pétrolières et gazières exécutées au large des côtes du Canada, pour voir notamment à la sécurité des travailleurs, à la conservation des ressources et à l'élimination des déchets et des agents polluants. Elle englobe dans son champ d'application l'exploration, le forage, la production, la conservation, l'entreposage, le transport, la distribution, le mesurage, le traitement et toutes les autres activités portant sur le pétrole et le gaz. Elle s'applique à toutes les régions situées au large des côtes canadiennes et à la partie continentale du Yukon et des Territoires du Nord-Ouest. L'article 3 de la Loi se lit comme suit:

"3. La présente Loi s'applique au pétrole et au gaz de chacune des zones suivantes, savoir:

a) le Territoire du Yukon ou les Territoires du Nord-Ouest;

b) les zones sous-marines adjacentes à la côte canadienne, jusqu'à une profondeur de deux cents mètres ou au-delà de cette limite jusqu'où la profondeur des eaux surjacentes permet l'exploitation des ressources naturelles du sol et du sous-sol sous-marin; et

c) les terrains qui appartiennent à Sa Majesté du chef du Canada ou dont les minéraux peuvent être légalement aliénés ou exploités par Sa Majesté du chef du Canada;

mais elle ne s'applique pas au pétrole et au gaz d'une telle zone si la zone se trouve dans les limites géographiques de l'une des dix provinces du Canada ou si l'administration des ressources pétrolières et gazières de la zone a été légalement transférée à l'une des dix provinces."

Le règlement qui régit les travaux de forage, le Règlement concernant le forage des puits de pétrole et de gaz au Canada, a été adopté en vertu de l'article 12 de la *Loi sur la production et la conservation du pétrole et du gaz*. Ses articles 87 et 104 concernent les levés en mer; entre autres, ils obligent les exploitants à présenter des plans de levé provisoires et définitifs et à faire exécuter des levés officiels pour déterminer la position des puits de développement et d'autres puits. L'article 10 du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada, établi en vertu de l'article 54 de la *Loi sur le pétrole et le gaz du Canada*, stipule que les exploitants sont tenus d'autoriser l'accès des lieux de forage et d'assurer leur collaboration à des arpenteurs mandatés.

Chapitre 3

La gestion des levés en mer

Pour être en mesure de gérer et de réglementer efficacement les travaux d'exploration et de mise en valeur des nombreuses sociétés pétrolières et gazières, pendant des périodes variables et sur une vaste partie des marges continentales du Canada, il faut un système capable de définir clairement des positions et des frontières uniques. En mer, ce système a les mêmes fonctions que sur la terre ferme: il doit faciliter l'octroi et l'exercice des droits accordés sur les minéraux d'une région donnée, prévenir les conflits qui mettent en cause des droits adjacents et faciliter le règlement des problèmes éventuels.

Pour le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest et les marges continentales canadiennes, on emploie le même système de quadrillage à coordonnées géographiques pour fixer les limites des régions visées par des droits pétroliers et gaziers. Ce système est défini dans les articles 4 à 9 du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada. Dans le cas des droits d'exploration, l'unité de base utilisée est l'étendue quadrillée, qui mesure 10 minutes (environ 19 kilomètres) de latitude et 15 ou 30 minutes de longitude, selon la latitude. Dans le cas des droits de mise en valeur, l'étendue quadrillée est subdivisée en sections à peu près carrées qui mesurent une minute (environ 2 kilomètres) de latitude.

Dans les autres pays où s'effectuent des travaux pétroliers en mer, les droits de mise en valeur sont également délimités au moyen d'un quadrillage à coordonnées géographiques. En général, les levés sont peu réglementés et, souvent, les sociétés d'exploitation établissent des systèmes géodésiques plus ou moins intégrés en collaboration avec d'autres entreprises et avec le pays d'accueil. L'Appendice A passe en revue les règlements appliqués aux travaux exécutés dans la mer du Nord et dans d'autres pays représentatifs, c'est-à-dire au large du Gabon, en Tunisie, dans les Émirats Arabes Unis, au Brésil et en Chine.

Pour délimiter les droits sur la recherche de minéraux durs dans les Territoires du Nord-Ouest, on emploie aussi un quadrillage géographique, mais différent de celui que l'on utilise pour le pétrole et le gaz. Ce quadrillage, qui est défini dans les articles 29 et 2 du Règlement sur l'exploitation minière au Canada, est basé sur le S.N.R.C. (Système national de référence cartographique) des feuillets de carte à 1 50 000. Ce quadrillage pourrait également être utilisé en mer si besoin était. Cependant, pour gérer les droits miniers en vertu du Règlement sur l'exploitation minière au Canada, on n'emploie pas de quadrillage géographique; l'unité de base est un claim, dont les limites doivent être marquées au sol au moyen de jalons ou de bornes. Dans le cas des claims situés à proximité de la côte, il existe des méthodes dites de "jalonnement des claims submergés", mais celles-ci ne peuvent guère être utilisées à plus de quelques centaines de mètres de la côte. L'atelier de 1970 sur les levés en mer a recommandé l'établissement d'un quadrillage à coordonnées géographiques pour fixer les limites des régions visées par des droits miniers sur le plateau continental du Canada. Si l'on venait à découvrir en mer des gisements rentables de minéraux durs, un système géographique serait probablement établi.

Limites et repères

Sur le continent, les limites sont généralement marquées au moyen de repères fichés en terre; leurs positions et leurs descriptions figurent dans des documents officiels. Cependant, les étendues quadrillées dans lesquelles sont accordés des droits pétroliers et gaziers, de même que leurs subdivisions, n'ont pas de repères; elles sont définies en coordonnées géographiques. Pour déterminer les positions d'un quadrillage géographique, il faut effectuer des mesures par rapport à des repères géodésiques du canevas local, dont les descriptions et les positions (coordonnées) peuvent être obtenues à la Division des levés géodésiques du Canada de l'E.M.R. ou auprès des organismes provinciaux compétents. Si les limites du quadrillage étaient marquées par des repères, ceux-ci auraient préséance; comme il n'y en a pas, la position des limites est déterminée par mesure des distances par rapport aux repères géodésiques les plus rapprochés.

La possibilité d'établir un réseau de repères géodésiques marins aux fins de la gestion des ressources du plateau continental du Canada était une préoccupation majeure du premier Atelier en 1970. Les trois qualités que doivent avoir les repères géodésiques sont la permanence, la visibilité et l'accessibilité. Ces trois conditions doivent être réunies si l'on veut confirmer la position d'une limite ou, au besoin, étendre un réseau géodésique pour définir la position d'autres limites avoisinantes. Lorsqu'il est question du bornage en mer, il faut aussi prendre en considération des facteurs économiques et la sécurité nationale. Les membres de l'Atelier ont songé à des tours, des bouées, des transpondeurs, des réflecteurs, des puits abandonnés, des câbles sous-marins, des épaves, des formes du relief sous-marin et des anomalies gravimétriques et magnétiques pour établir des repères, mais les ont tous jugés inadéquats. Seuls les repères géodésiques établis sur des plate-formes fixes (Figure 13) réunissent les trois conditions mentionnées ci-dessus, à savoir la permanence, la visibilité et l'accessibilité. La corrosion, la présence d'engins de pêche et les coûts prohibitifs sont des facteurs qui interdisent l'établissement de repères permanents sur la marge continentale avant la mise en place des installations d'exploitation. Les conclusions du premier Atelier au sujet du bornage en mer sont reproduites dans l'Appendice G.

En mer comme sur terre, il n'est pas nécessaire d'établir des repères sur les limites des zones visées par des permis, des concessions ou des accords qui confèrent des droits pétroliers et gaziers. Le levé doit permettre de définir la position de la limite théorique de l'étendue quadrillée par rapport à un puits et aussi par rapport aux limites du gisement. Dans la mesure où tous les levés sont établis en fonction du même canevas de référence avec une précision suffisante, il est possible de délimiter les droits accordés et de réglementer les méthodes employées sans avoir recours à des bornes-frontières.

Le levé des fonds marins se complique à mesure que l'on s'éloigne de la côte, notamment à cause de l'absence de repères du canevas local. Le tracé de la ligne du rivage, la profondeur d'eau et la présence de glace posent de sérieux problèmes aux

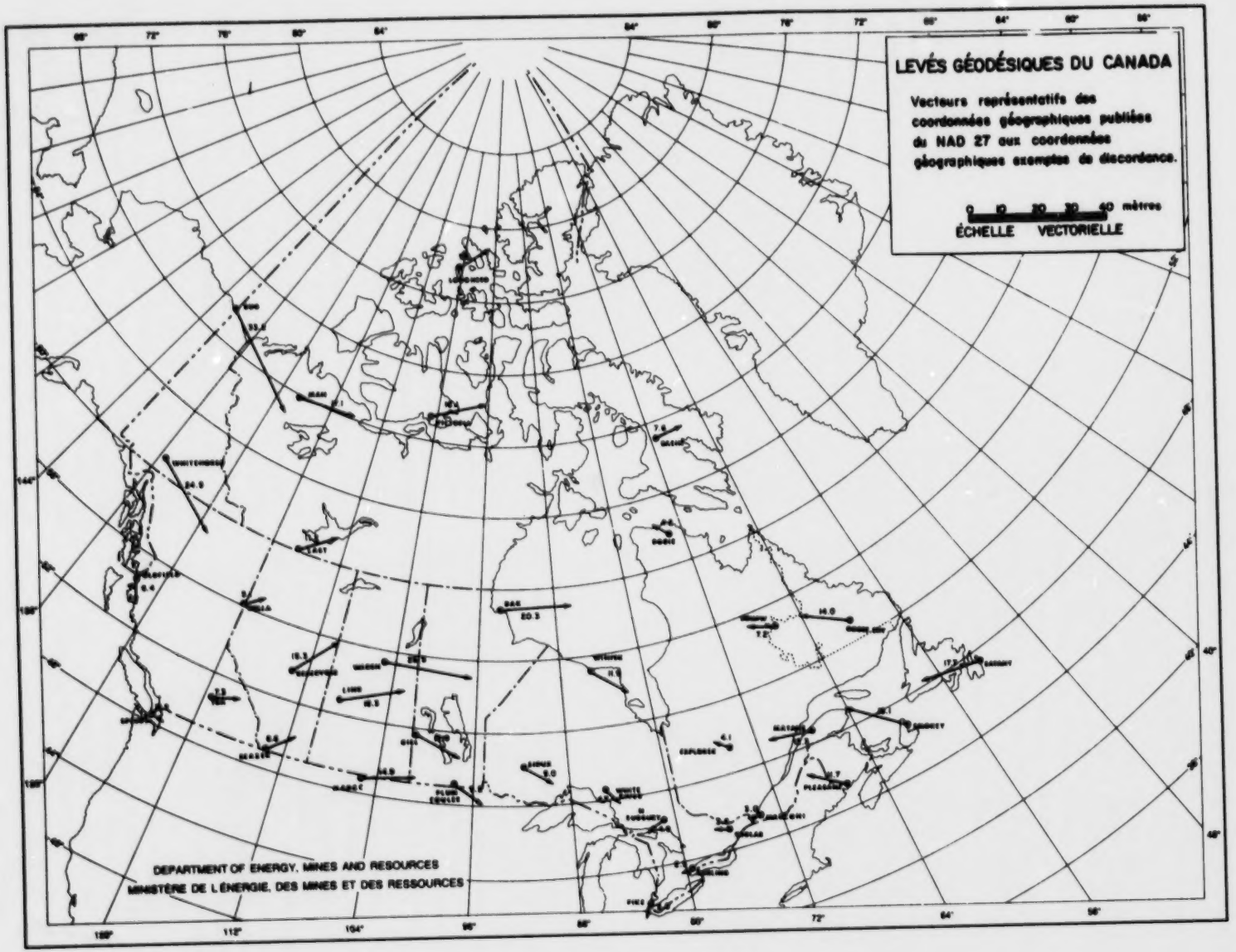


Figure 11
Discordances dans le système de référence de 1927

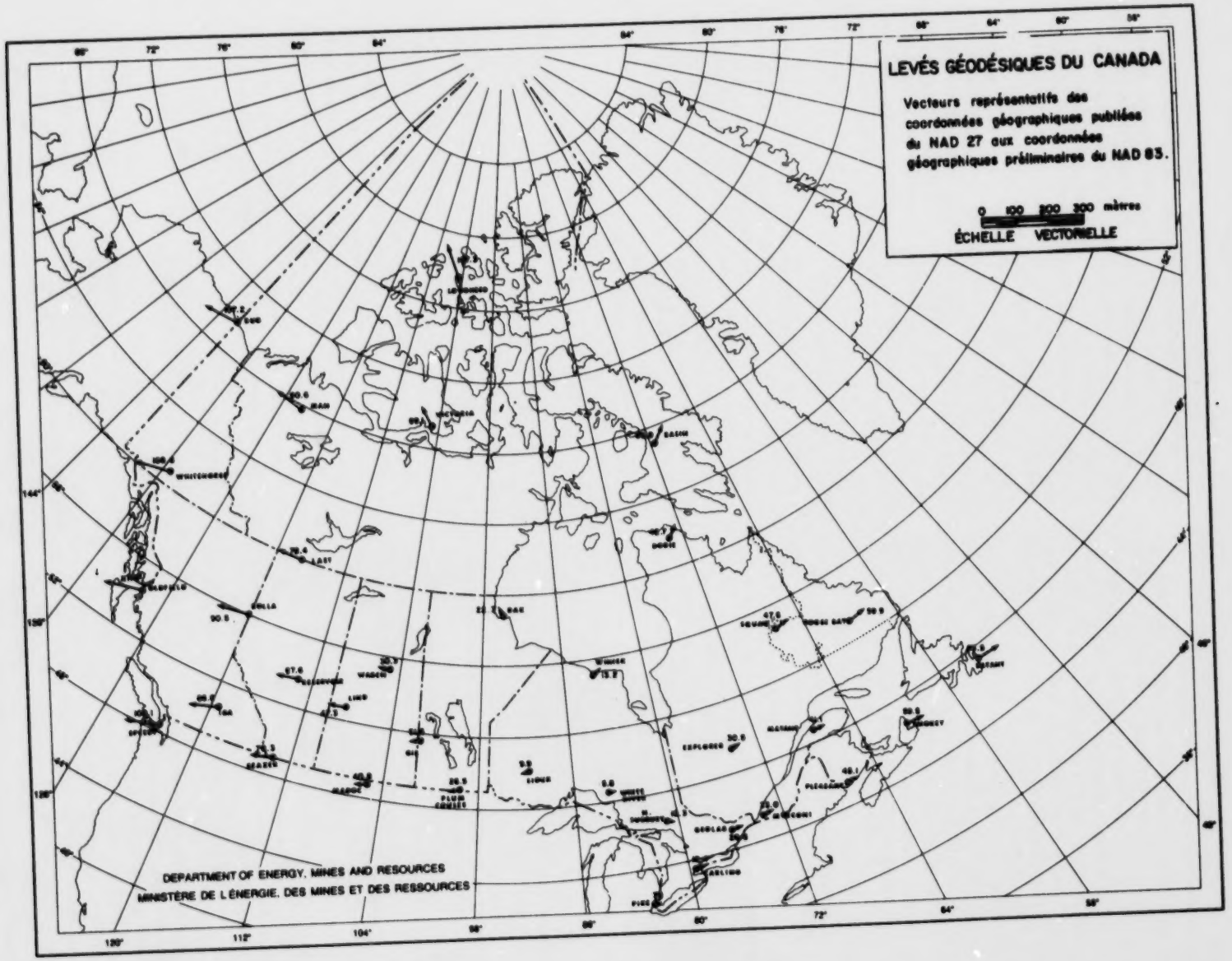


Figure 12
Écarts de positions entre le quadrillage géographique NAD 27 et le quadrillage géographique NAD 83

arpenteurs. On verra, dans d'autres chapitres de ce rapport, comment ces difficultés peuvent être surmontées.

L'absence de bornes-repères ou d'autres dispositifs qui rendent visible la limite des étendues quadrillées ne constitue pas un obstacle à la mise en valeur d'un gisement de pétrole ou de gaz, qu'il soit terrestre ou sous-marin. Lorsque, par suite d'études géophysiques, on découvre une zone d'intérêt qui chevauche la limite de deux concessions distinctes, les sociétés d'exploitation peuvent s'entendre pour exécuter un forage d'exploration à frais partagés. A l'étape de la mise en valeur, la position des puits est généralement déterminée de façon à tirer du gisement une production optimale. La position exacte du puits par rapport à la limite d'une étendue quadrillée est importante dans la mesure où elle permet à l'exploitant de rattacher la position du réservoir aux limites de l'étendue visée par le permis. Au moment de la mise en valeur, on aura besoin de ce renseignement pour répartir équitablement les droits minéraux, les redevances, les coûts aux gisements, etc., entre les exploitants. Les facteurs géologiques sont généralement moins bien connus que les positions géographiques.

Repères et points de référence

Bien que l'on utilise un quadrillage à coordonnées géographiques pour délimiter des droits de manière à obtenir un système théoriquement parfait, il existe en fait plusieurs quadrillages géographiques qui présentent entre eux des différences importantes. Il est donc nécessaire de préciser à quel système de référence les positions sont rapportées. Au Canada et aux États-Unis, le système de référence établi est constitué de listes de coordonnées de repères géodésiques que publie la Division des levés géodésiques du Canada et qui sont rapportées au réseau NAD27. Sur terre, les positions des limites du quadrillage pourraient être établies en mesurant les distances par rapport aux repères avoisinants. Cependant, en mer, il n'est pas toujours possible de rattacher des positions à des stations voisines.

Les repères les plus rapprochés peuvent se trouver à des centaines de kilomètres de la zone à lever, et les positions au large des côtes peuvent être déterminées au moyen de systèmes de radiolocalisation par satellite ou de sondages hydrographiques qui sont actuellement basés sur un système de référence différent des coordonnées NAD27 publiées. Il existe d'énormes différences, qui peuvent atteindre une centaine de mètres, entre les coordonnées d'un même point mesurées par rapport à des points origines distincts. Dans d'autres chapitres de ce rapport, il sera question des méthodes utilisées pour convertir des positions basées sur un point origine en positions établies par rapport à une autre surface de référence.

Étant donné que la triangulation nord-américaine de 1927 produit des déformations importantes qui sont très évidentes lorsqu'on utilise les méthodes de levés habituelles, les arpenteurs établissent actuellement un nouveau point origine qui s'appellera NAD83. Ce point sera basé sur un nouvelle figure de référence qui est plus universelle que la surface utilisée dans la triangulation nord-américaine de 1927. En raison de ce changement de figure de référence, la conversion des coordonnées du NAD27 au NAD83 produira des écarts beaucoup plus importants que ceux qui auraient résulté d'un rajustement basé sur la même surface de référence. On prévoit que la compensation initiale du canevas de premier ordre sera achevé en 1984 ou 1985, mais ce n'est que vers 1987 que les ordres de précision suivants seront complètement intégrés dans le canevas de premier ordre et que des listes complètes de coordonnées seront disponibles. Néanmoins, il est déjà permis d'estimer les variations des coordonnées des stations des réseaux de premier ordre. Ces estimations peuvent donner une évaluation précise des erreurs relatives des stations à l'intérieur d'une région limitée, mais il subsiste encore une incertitude au sujet d'un déplacement assez uniforme qui atteint une douzaine de mètres. La Figure 11 montre les discordances produites par le NAD27, et la Figure 12 donne l'écart entre les coordonnées NAD27 publiées et les coordonnées NAD83 prévues des stations du canevas de premier ordre de tout le Canada. Il reste à établir une procédure administrative pour adopter la nouvelle surface de référence, conserver l'ancienne ou régler la question des différences entre les limites des concessions déjà accordées et celles des concessions octroyées sous le nouveau régime de droits.

Systèmes de positionnement

En général, les premiers gisements de pétrole et de gaz qui ont été découverts en mer étaient relativement peu éloignés des côtes et, comme dans le golfe du Mexique, certains d'entre eux n'étaient que des prolongements de gisements terrestres connus. Aussi, a-t-on pu emprunter aux levés terrestres les systèmes de précision à courte distance. En mer, cependant, certaines zones prometteuses se trouvent hors de la portée des systèmes terrestres, et c'est pourquoi il faut recourir aux levés hydrographiques, qui ont moins de précision. Au début, les sociétés d'exploration canadiennes ne pouvaient employer que des installations de navigation de très faible précision.

Même actuellement, certains levés géophysiques font appel à des systèmes de navigation qui n'ont pas une grande précision absolue. Ces systèmes constituent habituellement un moyen fiable de retourner à une position ou de rattacher des positions les unes aux autres dans une aire limitée. On dit qu'ils ont une bonne fidélité. Cependant, il se peut que les positions établies en fonction du canevas de référence ne soient pas convenablement déterminées; on dit alors que le système a une faible précision. On peut s'accommoder d'un système doté d'une bonne fidélité sans nécessairement avoir une bonne précision lorsque le but recherché est essentiellement de retourner à un point en employant le même système. Si, par contre, il faut retourner à une position à l'aide d'un système différent, ou encore rattacher des positions à la limite d'une étendue quadrillée, il est nécessaire de disposer d'un système ayant une bonne précision.

Détermination de la position d'un puits

En vertu du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada, la position de chaque puits foré sur des terres canadiennes, sur terre comme en mer, doit être déterminée au moyen d'un levé. Le Règlement définit un puits comme une ouverture pratiquée dans le sol. Lorsqu'il s'agit d'un puits terrestre, cette définition ne présente aucune difficulté particulière; même lorsque le puits a été bouché et abandonné, l'arpenteur peut se servir d'un repère qui demeure en permanence sur l'emplacement. En mer, l'arpenteur a intérêt, pour plus de commodité, à fixer la position du train de forage à la hauteur de la plate-forme de forage ou, plus précisément, au manchon de la tige carrée.

Si le puits est foré d'une plate-forme fixe ou d'une plate-forme auto-élévatrice, l'ingénieur des forages doit fournir la mesure du décalage horizontal entre la position du manchon de la tige carrée et la position du puits sur les fonds marins. Dans le cas d'une plate-forme de forage flottante, la position en surface du manchon de la tige carrée, par rapport à sa position sur la tête de puits, doit être continuellement contrôlée et ramenée à la verticale.

En outre, lorsqu'un puits sous-marin a été bouché et abandonné, il ne reste généralement aucune trace visible de sa présence et la règle veut qu'aucun équipement ne soit abandonné sur le fond marin afin d'éviter que d'autres utilisateurs légitimes du milieu marin ne se heurtent à des obstacles. Le positionnement d'un puits d'exploration sous-marin doit être entrepris avant l'abandon et, en pratique, débute immédiatement après le début du forage.

Relevés de sondage

En vertu de l'article 21 b) du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada, la position du trou de sondage par rapport aux limites de l'unité et de la section doit être indiquée sur le plan du levé. Il appartient à l'ingénieur des forages de mesurer la distance entre les positions du trépan et de la tête du puits. Si l'on utilise des plate-formes de forage à trous multiples (Figures 13 et 14) pour forer des puits de développement, la précision et la fiabilité des relevés de sondage sont d'une importance capitale. À cette fin, on utilise couramment des inclinomètres ainsi que des compas magnétiques et gyrostatiques. Étant donné que la précision de ces compas diminue dans l'extrême Arctique, les données que l'on obtient sur la position du trépan perdent de la précision. Il faudra peut-être procéder à des recherches pour trouver d'autres méthodes de relevé des

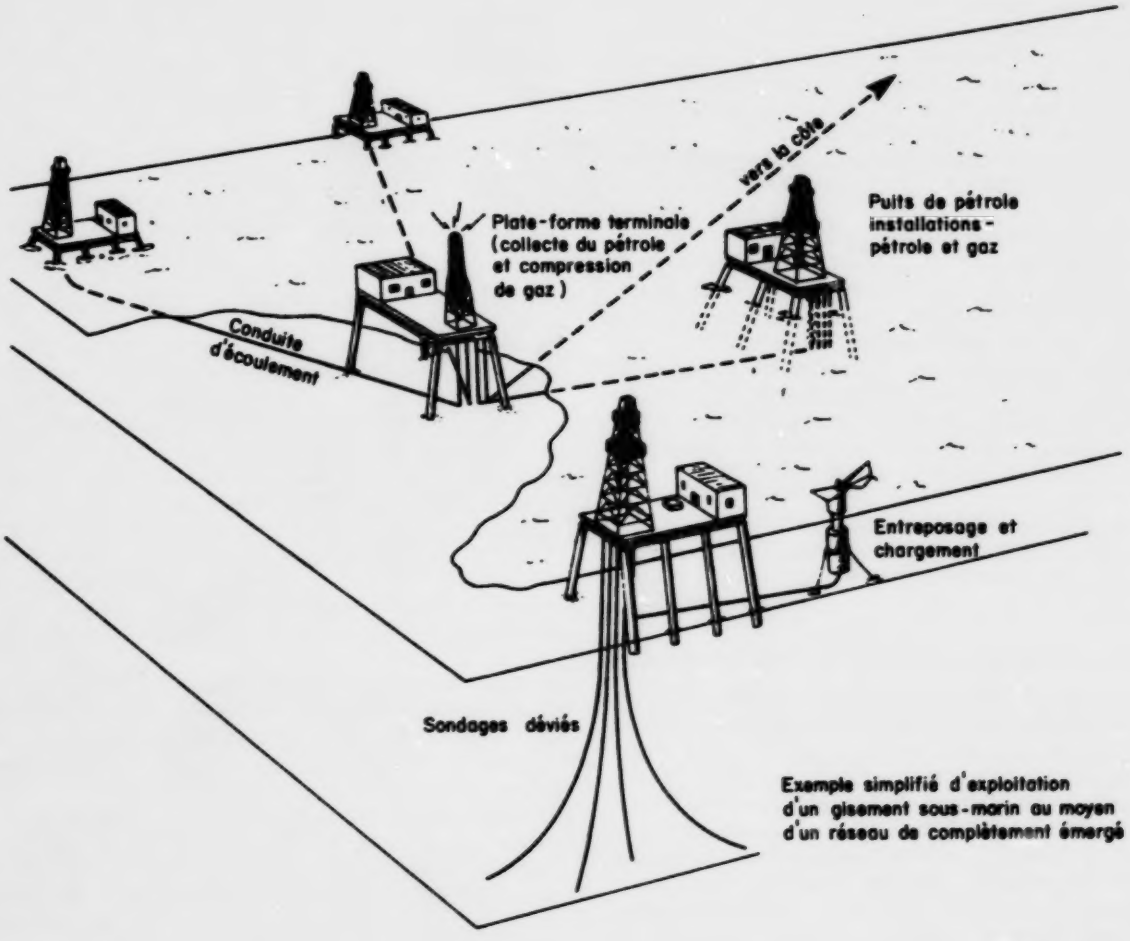


Figure 13
Système d'exploitation d'un gisement au moyen d'un réseau de complètement émergé

sondages. Scott et MacDonald (1979) et Volfand Dewardt (1980) se sont penchés sur l'incertitude qui entache les relevés de sondage.

Repères et complétions sous-marines

La production de pétrole ou de gaz sur le plateau continental du Canada n'a pas encore commencé; toutefois, si des techniques de complétion et de production sous-marines étaient appliquées à un gisement sous-marin de pétrole ou de gaz (Figures 5 et 14), la structure sous-marine qui en résulterait pourrait servir de socle à un repère géodésique. Un point de la structure pourrait alors être marqué ou décrit comme le repère géodésique. Pour rattacher une position à ce repère, il faudrait déterminer la position du navire à la surface par rapport à celle du repère. L'industrie du pétrole sous-marin emploie une variété de techniques pour accomplir cette tâche avec précision pendant que la plate-forme flottante se trouve juste au-dessus du puits.

S'il y a lieu d'augmenter un canevas à partir du repère après que la plate-forme de forage a quitté les lieux, il faut concevoir un système suffisamment précis pour rattacher la position du repère à celle du navire hydrographique qui se substitue à l'engin de forage. Cette opération fera sans doute intervenir les mêmes techniques qu'emploie l'industrie pour localiser la structure sous-marine et y retourner. L'arpenteur doit se familiariser avec les principes et les mécanismes de ces techniques afin d'être en mesure d'évaluer les diverses sources d'erreurs et la précision relative du système. Beaucoup d'autres recherches devront être faites pour que les problèmes géodésiques associés aux complétions sous-marines puissent être résolus.

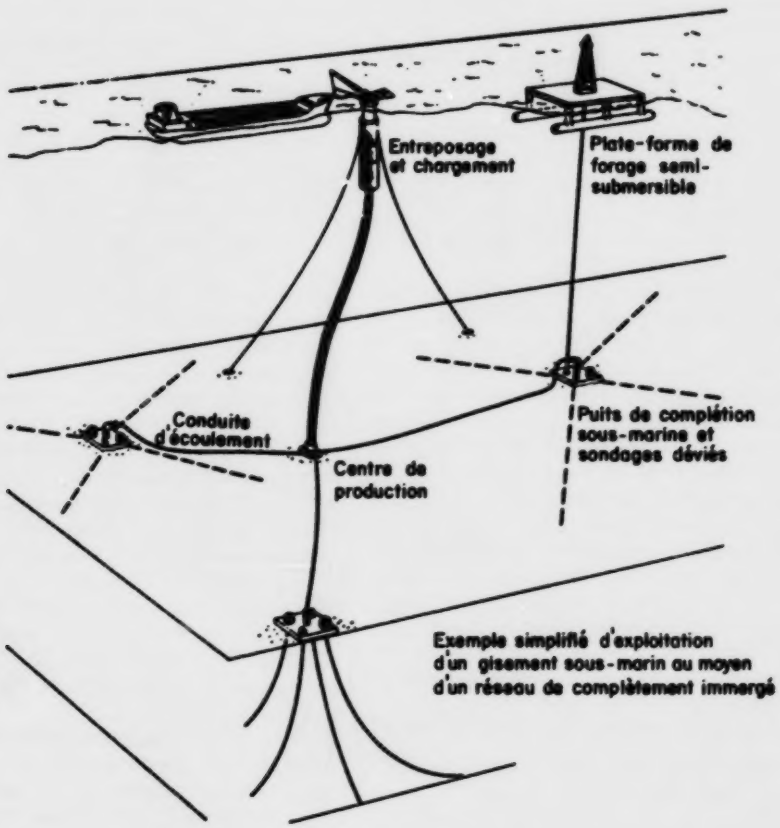


Figure 14
Système d'exploitation d'un gisement au moyen d'un réseau de complètement immergé

Rapports sur le positionnement des puits d'exploration

Les règlements qui régissent le positionnement d'un puits d'exploration visent essentiellement à faire en sorte que la position géographique du puits soit déterminée au moyen de méthodes fiables, à permettre à un exploitant de retourner à un puits où les opérations ont été interrompues et, avec les relevés de sondage exécutés par l'exploitant, à rendre possible le forage d'un puits de secours sur une autre installation de forage, de manière à rejoindre la formation géologique à l'endroit où le puits est en éruption non contrôlée.

Pour ces raisons, l'exploitant doit soumettre à l'organisme de réglementation un levé et un rapport complet sur les systèmes de positionnement utilisés. Les méthodes employées doivent être telles que le positionnement peut être évalué et répété, et toutes les stations côtières qui ont servi à déterminer la position du puits doivent être marquées par une borne permanente et décrites dans le levé. Les spécifications concernant les rapports sur le positionnement des puits d'exploration sont données dans l'Appendice E. Le plan et le rapport doivent être soumis à l'Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada, à Ottawa. Ils sont par la suite envoyés à l'Arpenteur général, qui les vérifie et les verse dans les archives d'arpentage des terres du Canada.

Ces rapports et levés n'ont pas le titre de levés officiels et peuvent être révisés si des levés plus précis ou plus fiables sont exécutés par la suite. Les positions des limites de l'étendue quadrillée ou de ses subdivisions par rapport au puits ne sont pas fixées au cours de ce levé.

Compétence des arpenteurs du Canada

Les recommandations formulées par les membres de l'Atelier de 1970 sur le levé des fonds marins ont été à l'origine de la formation d'un comité chargé d'étudier les qualités requises des arpenteurs-géomètres fédéraux et présidé par C.H. Weir, sous l'égide du Comité consultatif national des levés de précision et de la cartographie. Ce comité avait pour mandat de trouver des moyens de restructurer le secteur fédéral de la profession en tenant compte des progrès technologiques et de la nécessité de modifier la Loi sur l'arpentage des terres du Canada de manière à remplacer les brevets d'arpenteur fédéral et de topographe fédéral par un nouveau brevet. Le Comité a recommandé d'étendre la compétence des arpenteurs aux principes des levés en mer.

Par suite de ces recommandations, la Loi a été révisée en 1979; l'ancien brevet d'arpenteur fédéral a été remplacé par un brevet d'arpenteur-géomètre du Canada qui englobe de nouvelles disciplines, et le Manuel d'instructions pour l'arpentage des terres du Canada a été augmenté de chapitres sur les levés en mer. Des arpenteurs d'autres disciplines ont obtenu un brevet en vertu de la règle des droits acquis. C'est ainsi que, maintenant, beaucoup d'arpenteurs possédant un brevet d'arpenteur-géomètre du Canada sont compétents pour exécuter des levés officiels en mer.

Levés officiels

Les rapports sur le positionnement des puits de développement doivent se présenter sous la forme d'un levé officiel. Celui-ci est normalement effectué dès que possible après qu'une structure de forage a été mise en place. Parfois, il est nécessaire de procéder à un levé officiel pour des puits autres que des puits de développement (article 20 du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada). Le levé officiel a deux attributs qui le distinguent des autres levés: il établit des repères géodésiques et, du point de vue juridique, il est définitif. Il détermine la position de repères (ou de puits) au moyen de coordonnées juridiquement définitives et est réglementé par l'Arpenteur général du Canada. Il a pour but de fixer une fois pour toutes la position des limites par rapport à des repères locaux et par rapport aux puits, sans égard à son degré de précision. Les rapports théoriques entre toutes les limites des sections des étendues quadrillées ainsi que les coordonnées attribuées au premier puits (et aux repères) de cette étendue quadrillée définissent, aux yeux de la loi, les positions de toutes les limites des sections comprises à l'intérieur de cette même étendue quadrillée.

Un point est fondamental: les coordonnées officielles sont immuables même si des levés ultérieurs ou plus précis démontraient que les positions pourraient être établies avec plus d'exactitude. En fait, les repères deviennent des repères-témoins, et les coordonnées officielles correspondent à des distances de référence. A des fins scientifiques, ou pour établir des repères à l'extérieur de l'étendue quadrillée dans laquelle le repère est situé, le Géodésien fédéral ou l'Arpenteur général peuvent attribuer des coordonnées différentes des coordonnées juridiquement définitives qui ont été établies à l'intérieur de l'étendue quadrillée.

Au cours de la production, une structure permanente doit être mise en place à la tête du puits. Sur cette structure, on peut choisir et considérer comme repère géodésique un point qui peut être clairement et facilement défini. Cette position servira de point de référence, en fonction duquel les autres puits de la même étendue quadrillée pourront être rattachés avec précision et efficacité au premier puits et aux limites de la concession. Si l'on a recours à des structures de complétion sous-marine (Figure 14), il est possible d'effectuer des mesures à partir des repères sous-marins, mais la tâche se complique alors (Figure 13).

La partie E du Manuel d'instructions pour l'arpentage des terres du Canada, publié par l'Arpenteur général, traite des levés officiels en mer en vertu du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada.

Frontières et lignes de démarcation internationales

La frontière internationale qui sépare le Canada des États-Unis est jalonnée par de nombreux types de repères terrestres. Pour marquer l'emplacement des prolongements sous-marins de cette frontière, il n'a pas été possible d'ériger des repères de la façon traditionnelle. En vertu du Traité de 1908, la Commission de la frontière internationale a exigé que les sections côtières de la frontière internationale entre les eaux territoriales du Canada et des États-Unis soient indiquées par les repères à distance permanents établis sur la terre ferme. Deux sections sous-marines ont été repérées: la première traverse la baie de Passamaquoddy pour rejoindre l'océan Atlantique, et l'autre passe par les détroits de Géorgie, Haro et Juan de Fuca pour atteindre l'océan Pacifique. Dans les baies et les détroits, les points de référence ont été repérés par de grandes pyramides triangulaires en béton qui servent à repérer, directement ou par triangulation, la direction des frontières.

A une certaine distance de la côte, les points d'inflexion de la frontière sont rapportés à des repères, des radiobalises ou des phares. Certains phares utilisés ont une structure en charpente, de sorte qu'ils peuvent être démolis ou remplacés. Afin de retrouver leur position exacte, on a pris soin d'établir des repères-témoins dont les distances et les directions par rapport aux phares ont été déterminées avec précision.

Le plateau continental du Canada et celui des États-Unis sont limitrophes à quatre endroits distincts: dans le golfe du Maine, au large du détroit Juan de Fuca, au large de l'entrée Dixon et dans la mer de Beaufort. Les deux pays ne se sont pas encore entendus sur la position du prolongement marin de la frontière internationale aux fins de la recherche et de l'exploitation des ressources minérales. Il n'y a pas eu d'accord non plus entre la France et le Canada en ce qui concerne les droits sur les minéraux dans la région des îles St-Pierre et Miquelon.

Par une convention datée du 17 décembre 1973, les gouvernements du Canada et du Danemark ont établi une ligne de démarcation entre le Groenland et les îles de l'Arctique canadien, au-delà de laquelle aucune des parties signataires ne peut étendre ses droits de souveraineté aux fins de la recherche et de l'exploitation des ressources naturelles du plateau continental (Figure 8). Cette limite est définie par des lignes joignant des points d'inflexion auxquels ont été attribuées des coordonnées géographiques. L'accord ne s'applique pas au nord de 82° 13' de latitude.

Conformément à la Loi de 1964 sur les mers territoriales et les zones de pêche, le Canada a publié périodiquement les coordonnées de points NAD27, entre lesquels des lignes de base droites ont été établies. Ces lignes de base constituent en fait un trait de côte artificiel et simplifié, car elles recoupent des baies et d'autres échancrures de la côte tout en suivant le tracé général de la ligne du rivage. Les eaux contenues à l'intérieur des lignes de base sont considérées comme les eaux intérieures du Canada. La limite extérieure de la mer territoriale du Canada est située à une distance de 12 milles marins, mesurée par rapport à la laisse de basse mer, à des lignes de base droites ou à certaines terres qui sont à sec à marée basse et qui se trouvent en deçà de 12 milles de la côte. Des lignes de base droites ont été établies le long des côtes du Labrador, de Terre-Neuve, de la Nouvelle-Écosse, de l'Île de Vancouver et des Îles de la Reine-Charlotte.

Norman L. Nicholson (1979) donne de plus amples renseignements au sujet des lois et des règlements qui régissent les frontières du Canada, de ses provinces et de ses territoires. On trouve à l'Appendice H une liste complète des cartes qui indiquent les frontières internationales au large des côtes, ainsi que les limites des mers territoriales et des zones de pêche.

Chapitre 4

Les canevas géodésiques

Stations côtières

Si l'on veut employer de manière économique et efficace une méthode de mesure des distances pour déterminer des positions marines avec la précision requise, les stations côtières doivent être rattachées à un canevas qui est au moins du troisième ordre. Le positionnement des stations côtières doit passer par une étude attentive et détaillée de la topographie locale; les points choisis doivent donner, entre les lignes mesurées, des angles d'intersection satisfaisants. Les chances sont minces de trouver, dans quelque région que ce soit, des stations repérées qui puissent servir de repères côtiers à des systèmes de positionnement marin. Les tolérances de précision et d'espacement des repères géodésiques sont respectées dans presque toutes les régions côtières du Canada, à l'exception des rives sud de la baie d'Hudson et de la baie James, où un canevas a été établi à l'Aerodist et par levé Doppler, avec un espacement de 100 kilomètres et des côtes ouest de l'Île de Vancouver et des Îles de la Reine-Charlotte, où il existe un canevas côtier de quatrième ordre ou de moindre précision. (Voir le Tableau I).

Sur une bonne partie de la côte du nord du Canada, un canevas de troisième ordre a été constitué avant l'établissement du réseau de premier ordre adjacent. Certaines des stations de troisième ordre n'ont pas été rapportées par la suite au réseau de premier ordre. Le canevas côtier, tel qu'il existe actuellement, pourrait être amélioré sensiblement au moyen de rattachements et de compensations, si le besoin se faisait sentir dans une région donnée.

Pour ne pas trop amplifier les erreurs d'un canevas côtier que l'on prolonge sur des centaines de milles au large des côtes, il est préférable que le canevas côtier à partir duquel sont réalisés des levés en mer ait une précision du deuxième ordre.

Base nationale de données géodésiques

Depuis 1971, la Division des levés géodésiques du Canada met au point un système informatisé de stockage et d'extraction de données géodésiques. Le fichier utilisé à cette fin contient des coordonnées (avec leur ordre de précision), des hauteurs, des données sur les repères, des données sur les stations, des données sur les organismes, des photographies, ainsi que le texte des descriptions. Il renferme la majeure partie de l'information géodésique qui est habituellement demandée à la Division des levés géodésiques du Canada.

Les enregistrements relatifs à chacun des points géodésiques sont classés suivant le numéro de la station et accessibles au moyen d'un système de gestion de base de données appelé "System 2000". Il est ainsi possible de rappeler des enregistrements par de nombreux paramètres, comme le numéro du point, sa position entre des limites géographiques, ou encore sa position à l'intérieur d'un rayon donné d'une position en particulier. Les résultats peuvent se présenter sous diverses formes et, grâce à la modularité du système, il est facile d'ajouter d'autres modes de représentation. Les étapes les plus difficiles et les plus coûteuses sont l'assemblage, le codage et la validation des données à mémoriser. En 1982, pas moins de 126 000 points géodésiques avaient une entrée dans la base de données. On prévoit que le public pourra avoir directement accès aux fichiers lorsque le système aura été doté des perfectionnements et des raffinements nécessaires.

Pour avoir le droit d'utiliser la Base nationale de données géodésiques, l'organisme participant a besoin d'un terminal, d'un numéro de code financier et d'un code d'accès. On lui facture les frais de communication et les frais d'utilisation de l'ordinateur. En plus des données de base fournies par la Division des levés géodésiques du Canada, l'organisme peut mémoriser ses propres informations dans le fichier; il doit alors payer des frais de stockage sur disque. Des codes peuvent également être employés pour limiter l'accès ou apporter des modifications à des données précises.

Compensation scientifique des canevas géodésiques

La Division des levés géodésiques du Canada a procédé à plusieurs rajustements régionaux et nationaux des réseaux primaires du Canada, en utilisant différentes surfaces de référence ou différents types et degrés de contrainte. Les coordonnées de ces compensations peuvent être utiles dans l'étude des systèmes de levé ou des surfaces de référence. La Figure 13 présente des données issues d'une compensation de ce genre. Notons que, même si les coordonnées sont basées sur la même surface de référence et ont été utilisées pour exécuter la première compensation NAD27, elles ne sont pas considérées comme des valeurs NAD27. Afin d'éviter la confusion, la Division des levés géodésiques du Canada ne les diffuse pas au public, sauf pour certains usages bien déterminés.

Spécifications relatives à la précision

Les ordres de précision des canevas dont il est fait état dans ce rapport correspondent à ceux qui sont présentés dans le document "Spécifications pour levés de contrôle et conseils concernant la construction des repères", publié par la Direction des levés et de la cartographie, ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, en 1978 (voir le Tableau II). Cette classification est basée sur la dimension maximale de la région de confiance (ellipse) au niveau de confiance de 95 %, entre deux points quelconques du réseau (après compensation). Cette dimension maximale s'obtient au moyen de la formule suivante:

$$r = C\,(d + 0{,}2) \qquad (1)$$

où

- r = la dimension maximale (demi-grand axe) en centimètres
- C = une constante dont la valeur dépend de l'ordre de précision
- d = la distance en km entre les points considérés.

TABLEAU I

Précision relative des coordonnées NAD27 publiées et espacement des repères le long de la côte canadienne, en 1982

	CANEVAS		STATIONS CÔTIÈRES		
RÉGION	Espacement (km)	Demi-grand axe de la région de confiance de 95 % (ppm)	Espacement (km)	Demi-grand axe de la région de confiance de 95 % (ppm)	REMARQUES
Nouvelle-Écosse Côte sud-est	30	20	15	230	
Sud et est de Terre-Neuve	15-150	100	10-15	230	
Golfe du Saint-Laurent	30	60			Division de troisième ordre dans la partie sud. Le point origine local pour l'Île-du-Prince-Édouard, la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick n'est pas le NAD27.
Côte du Labrador	200	60	10	230	
Détroit d'Hudson-Ungava	40	20	10	230	Le canevas côtier n'a pas été compensé en fonction de la triangulation de précision effectuée par la suite.
Nord de la baie d'Hudson	50	20	10-15	230	Stations côtières non compensées en fonction de la triangulation de précision exécutée par la suite. Le canevas NAD27 est trop étroit d'environ 30 mètres à travers l'extrémité nord de la baie d'Hudson.
Sud de la baie d'Hudson (y compris la baie James)	100	40			Aerodist et Doppler
Îles arctiques	75	20	10-15	150	
Mer de Beaufort	0	25	10-15	150	Amélioration du canevas côtier par compensation et autres levés en 1982.
Côte du Pacifique	50	50	1-5	1250	Le canevas de base est déformé d'environ 50 ppm près de Prince Rupert. D'autres levés ont été faits en 1975.
Au large de la côte du Pacifique	250	50	8	1250	D'autres travaux ont été faits sur les Îles du la Reine-Charlotte en 1975.

NOTA: Les chiffres de précision donnés dans le tableau ci-dessus sont tirés principalement d'une évaluation des écarts observés lorsque des différences de positions, d'après des coordonnées publiées, sont comparées à des mesures faites au moyen de techniques plus précises; ils font voir clairement des discordances causées par des fermetures forcées. Ils servent à évaluer la précision absolue de distances mesurées soit entre des points adjacents d'un même réseau, soit entre des points séparés par quelques centaines de kilomètres.

TABLEAU II

Normes de précision des levés de canevas planimétriques

		Demi-grand axe de la région de confiance au niveau de probabilité de 95 %, r = C (d + 0,2)											
	Constante	d = 0,1 km			d = 3 km			d = 30 km			d = 300 km		
Ordre	(C)	cm	ppm	rapport	cm	ppm	rapport	m	ppm	rapport	m	ppm	rapport
1	2	0.6	60	1/16700	6.4	21	1/47000	0.6	20	1/50000	6	20	1/50000
2	5	1.5	150	1/6700	16.0	53	1/19000	1.5	50	1/20000	15	50	1/20000
3	12	3.6	360	1/2800	38.4	128	1/7800	3.6	121	1/8300	36	120	1/8300
4	30	9.0	900	1/1100	96.0	320	1/3100	9.1	302	1/3300	90	300	1/3300

Chapitre 5

Les systèmes de références géodésiques

Une des activités fondamentales des géomètres et géodésiens consiste à déterminer les coordonnées de points de la surface terrestre. À cette fin, divers systèmes de coordonnées ont été définis ou, plus exactement, ont évolué. Il est d'usage de définir la position d'un point par deux coordonnées "planimétriques" (latitude et longitude) et une coordonnée "altimétrique" (altitude au-dessus du niveau de la mer). Les méthodes généralement utilisées pour calculer ces coordonnées sont la triangulation (pour la latitude et la longitude) et le nivellement (pour l'altitude). Il était donc naturel que l'on aborde séparément les réseaux planimétriques et altimétriques. Cette distinction a amené les géomètres à définir deux *surfaces de référence*: la surface de référence ellipsoïdale (ou planimétrique), à laquelle sont rapportées les latitudes et les longitudes, et la surface de référence géoïdale (ou altimétrique) à laquelle sont rapportées les altitudes.

Grâce à des méthodes modernes, comme le positionnement par satellite, on obtient maintenant des coordonnées cartésiennes à trois dimensions (3D). Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de définir une surface de référence. Il faut toutefois déterminer les rapports entre le système de coordonnées 3D d'une part et les surfaces de référence planimétrique (ellipsoïdale) et altimétrique (géoïdale) classiques d'autre part.

Dans ce chapitre, il sera question des principaux systèmes de références, de leur définition et de leurs relations.

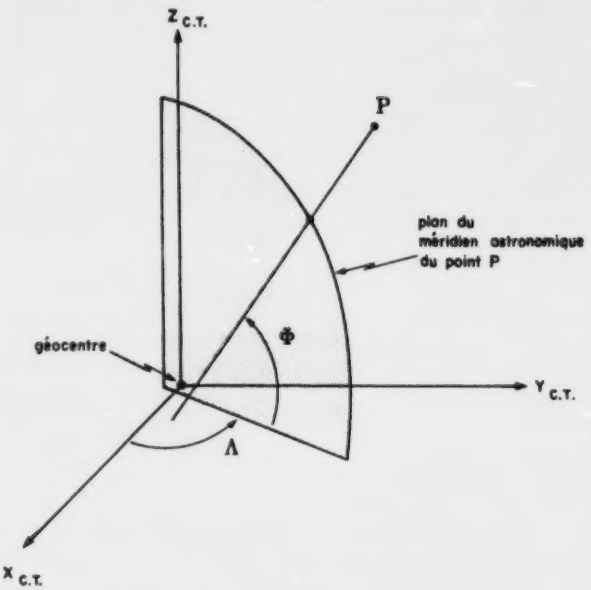


Figure 15
Relation entre le système terrestre classique et la latitude et longitude astronomiques

Le système terrestre classique

Le système terrestre classique (CT) est un système de coordonnées cartésiennes à trois dimensions qui a son origine au centre de la Terre. L'axe Z correspond à la position moyenne de l'axe de rotation de la Terre entre 1900 et 1905. L'axe X est parallèle au plan du méridien astronomique passant par Greenwich. L'axe Y est choisi de manière à ce que les trois axes soient perpendiculaires entre eux. Ce système est parfois appelé "système terrestre moyen", mais ce nom suppose que l'axe Z est toujours l'axe de rotation moyen, ce qui n'est évidemment pas le cas. Grâce à des techniques modernes, telles que le positionnement par satellite Doppler, nous avons été en mesure de calculer les coordonnées 3D dans le système CT.

Latitude et longitude astronomiques et hauteur au-dessus du géoïde

Ces trois coordonnées forment l'un des systèmes de coordonnées les plus fondamentaux. La latitude astronomique (Φ) et la longitude astronomique (Λ) sont déterminées par observation des étoiles et du temps. La Figure 15 montre leurs rapports avec le système CT, correction faite du non-alignement de l'axe instantané de rotation de la Terre et de l'axe Z du système CT.

Le géoïde se définit comme la surface équipotentielle de la Terre, qui coïnciderait avec la surface hypothétique des mers non troublées, c'est-à-dire soustraites à l'influence des marées, des courants, de la non-homogénéité des températures, de la salinité, etc. Les hauteurs du géoïde au-dessus du sphéroïde de 1866 de Clarke (NAD27) sont indiquées dans le Tableau D1. Il est possible de déterminer la position du géoïde en milieu côtier, en observant les variations de la hauteur d'eau dans le temps et en les corrigeant des phénomènes mentionnés ci-dessus au moyen des meilleures données disponibles. Actuellement, on considère comme la position approximative du géoïde la hauteur moyenne de l'eau observée à des marégraphes sur de nombreuses années (et corrigée uniquement des cycles des marées). C'est par rapport à ce "niveau moyen des mers" que sont définies les hauteurs "au-dessus du niveau moyen des mers" de toutes les stations du Canada, les différences de hauteur étant obtenues par nivellement. Cette méthode rend de bons services depuis nombreuses années, mais certaines perturbations non corrigées de la surface des mers et certaines erreurs systématiques du nivellement sont une source de préoccupation croissante. Beaucoup d'efforts sont faits actuellement pour mieux comprendre diverses influences systématiques qui s'exercent sur la détermination du géoïde côtier et sur le nivellement comme tel. Le réseau de nivellement géodésique du Canada fait actuellement l'objet d'une étude intensive, en prévision d'un rajustement prévu 1987 (North American Vertical Datum 1987). L'adoption de ce nouveau système de références devrait avoir des effets négligeables sur les levés en mer.

Systèmes ellipsoïdaux

Étant donné que la Terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution, cette figure géométrique constitue une surface mathématique tout indiquée pour les calculs géodésiques. En

outre, l'ellipsoïde se prête bien à la modélisation du champ gravimétrique de la Terre.

Les relations générales entre le système ellipsoïdal et le système terrestre classique sont indiquées dans la Figure 16, où ϕ, λ, h correspondent respectivement à la latitude, à la longitude et à la hauteur ellipsoïdales. On notera qu'en règle générale, le centre géométrique de l'ellipsoïde de référence (c'est-à-dire l'origine du système cartésien X_E, Y_E, Z_E) est décalé par rapport au centre de la Terre. Ce décalage peut être décrit par trois translations X_o, Y_o, Z_o (rapportées au système CT). En outre, les axes X_E, Y_E, Z_E ne sont pas toujours parallèles aux axes $X_{C.T.}$, $Y_{C.T.}$, $Z_{C.T.}$ ce que l'on peut exprimer au moyen des trois petits angles de rotation ω_X, ω_Y and ω_Z indiqués dans la figure. En pratique, cependant, ces rotations sont habituellement définies par des valeurs nulles et, dans ce cas, le rapport mathématique entre ϕ, λ, h et $X_{C.T.}$, $Y_{C.T.}$ $Z_{C.T.}$ est donné par:

$$X_{C.T.} = X_o + (\nu + h) \cos\phi \cos\lambda \quad (2)$$

$$Y_{C.T.} = Y_o + (\nu + h) \cos\phi \sin\lambda \quad (3)$$

$$Z_{C.T.} = Z_o + (\nu \cdot b^2/a^2 + h) \sin\phi \quad (4)$$

où a et b représentent respectivement le demi-grand axe et le demi-petit axe de l'ellipsoïde et N est donné par:

$$\nu = a(1-e^2 \sin^2\phi)^{-1/2} \quad (5)$$

où $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$

La transformation de $X_{C.T.}$, $Y_{C.T.}$, $Z_{C.T.}$ à ϕ, λ, h s'effectue de la façon suivante: d'abord, les coordonnées CT sont transformées en X_E, Y_E, Z_E comme suit:

$$X_E = X_{C.T.} - X_o \quad (6)$$

$$Y_E = Y_{C.T.} - Y_o \quad (7)$$

$$Z_E = Z_{C.T.} - Z_o \quad (8)$$

puis, soient $\epsilon^2 = (a^2 - b^2)/b^2$,

$p = (X_E^2 + Y_E^2)^{1/2}$

et $u = \arctan((Z_E.a)/(p.b))$

nous obtenons,

$$\phi = \arctan \frac{Z_E + \epsilon^2 b \sin^3 u}{p - e^2 a \cos^3 u} \quad (9)$$

$$\lambda = \arctan(Y_E/X_E) \quad (10)$$

$$h = Z_E/\sin\phi - \nu \cdot b^2/a^2 \quad (11)$$

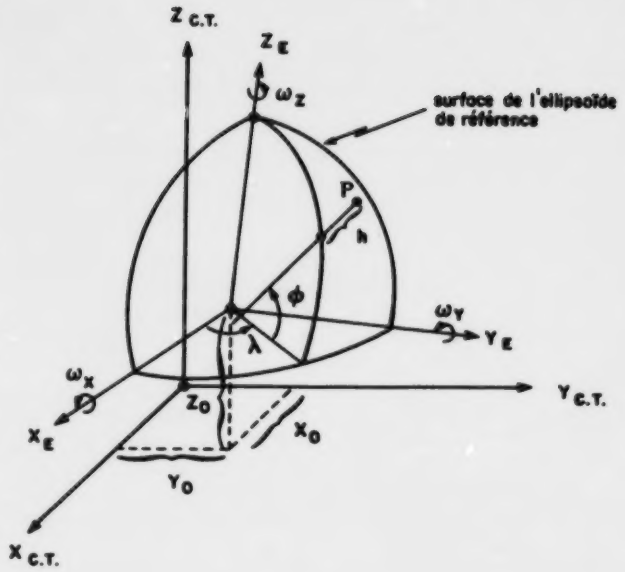


Figure 16
Relation entre le système terrestre classique et le système de référence ellipsoïdal

Réalisation des divers systèmes de références

Dans ce contexte, réaliser un système de référence consiste à le situer le mieux possible par rapport à la surface de la Terre. Pour y parvenir, il faut effectuer des observations. Par exemple, pour réaliser le géoïde en milieu côtier, on observe le niveau moyen des mers au moyen de marégraphes. Dans la mesure où nous pouvons modéliser l'écart entre le niveau moyen des mers et le géoïde, il nous est possible d'estimer la hauteur des repères côtiers. Ces hauteurs indiquent la position de la surface de référence géoïdale.

Dans la méthode classique utilisée pour réaliser des systèmes ellipsoïdaux, nous définissons trois autres quantités, à savoir N, ξ, et η, pour illustrer la relation entre la latitude et la longitude astronomiques d'une part et le système ellipsoïdal d'autre part. Pour plus de simplicité, nous retiendrons l'ellipsoïde de référence géocentrique illustré dans la Figure 17.

La hauteur géoïdale N est la hauteur du géoïde au-dessus de l'ellipsoïde, et la déviation de la verticale θ est l'angle entre le zénith et la normale à l'ellipsoïde, qui, pour plus d'utilité, peut être représenté par sa composante nord-sud ξ et sa composante est-ouest η. Nous pouvons constater que la hauteur ellipsoïdale h est donnée avec beaucoup de précision par:

$$h = H + N, \quad (12)$$

où H est la hauteur du point P au-dessus du géoïde, mesurée sur la verticale passant par P. La relation entre les coordonnées ellipsoïdales ϕ, λ, et leurs équivalents astronomiques Φ, Λ, *lorsque les axes du système ellipsoïdal sont présumés parallèles à ceux du système terrestre classique*, peut être exprimée en terme de déviation de la verticale, de la façon suivante:

$$\xi = \Phi - \phi \quad (13)$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos\phi \quad (14)$$

En supposant toujours que les axes du système ellipsoïdal sont parallèles à ceux du système CT, la relation entre l'azimut astronomique A et l'azimut géodésique α peut être exprimée comme suit:

$$A - \alpha = \eta \tan\phi + (\xi \sin\alpha - \eta \cos\alpha) \cot Z \quad (15)$$

où Z est l'angle zénithal entre le zénith et l'objet cible. L'équation (15) est appelée équation de Laplace; on l'utilise parfois sous sa forme tronquée, étant donné que Z est habituellement voisin de 90°.

$$A - \alpha = \eta \tan\phi = (\Lambda - \lambda) \sin\phi \quad (16)$$

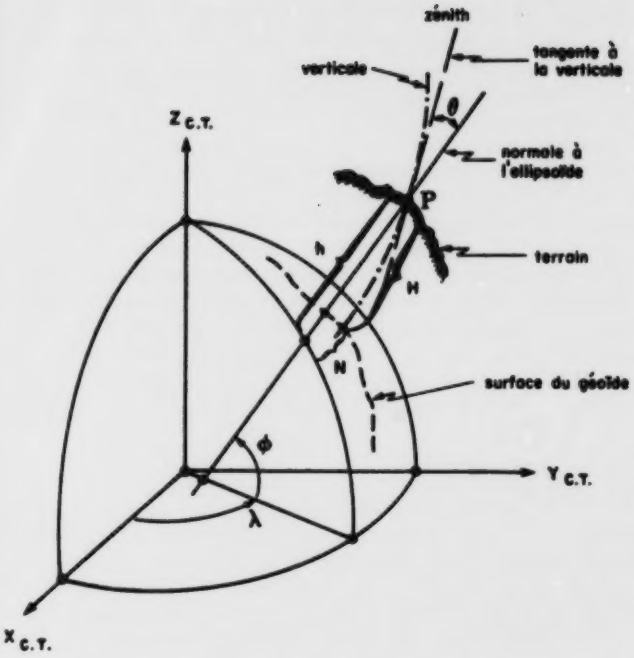


Figure 17
Rapport du géoïde au système ellipsoïdal

Les équations (13), (14), (15) et (16) supposent que les axes ellipsoïdaux et les axes CT sont parallèles. Lorsqu'elles sont utilisées pour calculer des réseaux géodésiques, le parallélisme des deux systèmes est respecté dans la mesure où les erreurs d'observation et les erreurs systématiques le permettent.

La détermination et le positionnement d'un ellipsoïde de référence par rapport à la Terre peuvent s'accomplir de deux façons différentes. Les deux méthodes permettent de définir la taille et la forme de l'ellipsoïde de référence en adoptant des valeurs pour les demi-axes a et b (ou, ce qui revient au même, a et l'aplatissement f = (a-b)/a, ou encore a et l'excentricité e). Habituellement, on choisit comme point de départ une des stations du canevas géodésique. On peut ensuite définir la position du système ellipsoïdal en se servant des équations (13) à (15) et en attribuant des valeurs à ϕ_o, λ_o, N_o au point initial. Les latitudes, longitudes et azimuts astronomiques observés en de nombreux points du réseau, au moyen de l'équation de Laplace, ont pour effet de fixer les trois constantes de rotation à des valeurs nulles. On choisit les valeurs de ϕ_o et λ_o de manière à ce que les valeurs des déviations soient faibles à tous les points du réseau où les latitudes et longitudes astronomiques ont été observées. C'est ainsi que l'on a procédé pour positionner l'ellipsoïde de Clarke de 1866 (a = 6 378 206,4 m, b = 6 356 583,8 m) utilisé dans la triangulation nord-américaine de 1927 (NAD27).

De nos jours, la méthode utilisée pour positionner un ellipsoïde de référence consiste à fixer les valeurs de trois composantes de translation X_o, Y_o, Z_o ainsi que des trois angles de rotation ω_X, ω_Y, ω_Z. En effet, grâce au satellite, il est maintenant possible d'obtenir des coordonnées cartésiennes à trois dimensions pour définir les stations géodésiques dans les systèmes de référence du Naval Weapons Laboratory (NWL), comme le NWL 9D, qui se rapprochent beaucoup du système CT. Moyennant quelques corrections mineures, ces coordonnées peuvent être intégrées dans le système CT. En 1979, l'Union internationale de géodésie et de géophysique, réunie à Canberra, a adopté un ellipsoïde plus universel, qui peut servir à la fois de modèle gravimétrique et de surface de référence planimétrique à toutes les nations. Il serait logique d'adopter la taille et la forme de cet ellipsoïde (a = 6 378 137,000 m, b = 6 356 752,314 m) comme la nouvelle surface de référence des réseaux géodésiques et, du même coup, de ramener à zéro les translations X_o, Y_o, Z_o et les rotations ω_X, ω_Y, ω_Z.

D'ici quelques années, une compensation rigoureuse des réseaux géodésiques d'Amérique du Nord sera effectuée par rapport à un ellipsoïde géocentrique appelé NAD83. Le positionnement de cet ellipsoïde s'effectuera probablement en ramenant à zéro les valeurs de X_o, Y_o, Z_o, ω_X, ω_Y et en définissant la longitude origine au moyen des azimuts et longitudes astronomiques observés. L'équation de Laplace ne sera pas utilisée comme telle; on aura recours à un nouveau modèle mathématique dans lequel l'équation de Laplace sera employée d'une façon plus générale.

Transformations sur des surfaces de référence

Il est souvent nécessaire de transformer des coordonnées ellipsoïdales rapportées à une surface de référence donnée en coordonnées ellipsoïdales déterminées par rapport à une autre surface de référence (c'est-à-dire un ellipsoïde de référence différent, défini par des constantes différentes). Lorsque les rotations ω_X, ω_Y, ω_Z auront des valeurs nulles dans les deux systèmes de références, on emploiera la méthode générale de transformation qui est décrite ci-dessus.

Soient les coordonnées ϕ_1, λ_1, et h_1, d'un point rapporté à la surface de référence 1 dont les paramètres sont a_1, b_1, (demi-axes) et $X_{0,1}$, $Y_{0,1}$, $Z_{0,1}$ (translations) qu'il faut transformer en coordonnées ϕ_2, λ_2, h_2 rapportées à la surface de référence 2 dont les paramètres sont a_2, b_2 et $X_{0,2}$, $Y_{0,2}$, $Z_{0,2}$.

La première opération consiste à transformer les coordonnées ϕ_1, λ_1, h_1, en coordonnées CT au moyen des équations (2), (3) et (4), c'est-à-dire;

$$X_{C.T.} = X_{o,1} + (\nu_1 + h_1) \cos \phi_1 \cos \lambda_1$$
$$Y_{C.T.} = Y_{o,1} + (\nu_1 + h_1) \cos \phi_1 \sin \lambda_1$$
$$Z_{C.T.} = Z_{o,1} + (\nu_1 \cdot b_1^2/a_1^2 + h_1) \sin \phi_1$$

où

$$\nu_1 = a_1 (1 - e_1^2 \sin^2\phi_1)^{-½}$$

et

$$e_1^2 = (a_1^2 - b_1^2)/a_1^2$$

Puis, en utilisant ces coordonnées CT dans les équations (6), (7) et (8), nous pouvons calculer des coordonnées cartésiennes X_{E2}, Y_{E2}, Z_{E2} (rapportées à la surface de référence 2), c'est-à-dire:

$$X_{E2} = X_{C.T.} - X_{0,2}$$
$$Y_{E2} = Y_{C.T.} - Y_{0,2}$$
$$Z_{E2} = Z_{C.T.} - Z_{0,2}$$

Finalement, en se servant de ces coordonnées ainsi que des demi-axes a_2, b_2, de la surface de référence 2, nous pouvons calculer ϕ_2, λ_2, h_2 (rapportées à la surface de référence 2) à l'aide des équations (9), (10) et (11), c'est-à-dire:

$$\phi_2 = \arctan \frac{Z_{E2} + \epsilon_2^2 b_2 \sin^3 U_2}{P_2 - e_2^2 a_2 \cos^3 U_2}$$

$$\lambda_2 = \arctan (Y_{E2}/X_{E2})$$

$$h = Z_{E2}/\sin \phi_2 - \nu_2 \cdot b_2^2/a_2^2$$

où,

$$\epsilon_2^2 = (a_2^2 - b_2^2)/b_2^2$$

$$P_2 = (X_{E2}^2 + Y_{E2}^2)^{1/2}$$

$$U_2 = \arctan ((Z_{E2} \cdot a_2)/(P_2 \cdot b_2))$$

et

$$\nu_2 = a_2 (1 - e_2^2 \sin^2 \phi_2)^{-1/2}$$

Surface de référence de la triangulation nord-américaine de 1927 (NAD27)

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la surface de référence de la triangulation nord-américaine de 1927 (NAD27) a été définie, au moyen de la méthode classique, comme un ellipsoïde de Clarke de 1866 positionné à un point initial arbitraire, ses axes parallèles au système CT, à l'aide des équations 13 à 16. (Voir Mitchell 1948, Bomford 1971.) La station de MEADES RANCH, au Kansas, États-Unis, a été adoptée comme point initial affecté des coordonnées ϕ_0, λ_0. La hauteur géoïdale a été fixée à une valeur nulle. Les huit constantes nécessaires pour définir la forme et la position de l'ellipsoïde de référence et l'orientation de ses axes sont:

$$a = 6\,378\,206.4 \text{ m}$$
$$b = 6\,356\,583.8 \text{ m}$$
$$\omega_X = 0$$
$$\omega_Y = 0$$
$$\omega_Z = 0$$
$$\phi_0 = 39° 13' 26.686" \text{ Nord}$$
$$\lambda_0 = 98° 32' 30.506" \text{ Ouest}$$
$$N_0 = 0$$

Entre 1927 et 1932, les réseaux géodésiques de premier ordre en place au Canada et aux États-Unis, ainsi que quelques réseaux de deuxième ordre, ont été rajustés en fonction du système de références défini ci-dessus; on a ainsi produit un système de coordonnées qui sont demeurées fixes depuis ce temps. À cette époque, il n'y avait au Canada que quelques réseaux qui pouvaient être intégrés: réseaux de triangulation dans le sud du Québec et de l'Ontario, et le long de la frontière méridionale des provinces de l'Ouest. Par la suite, les réseaux de triangulation de premier ordre ont été prolongés vers le nord à partir de stations des canevas originaux, puis on les a rajustés en fonction du même système de références, en conservant les coordonnées des réseaux de départ. Les coordonnées de ces nouveaux réseaux, appelées "valeurs NAD27", ont à leur tour été maintenues fixes lorsqu'elles ont servi d'origine à d'autres prolongements.

À mesure que le Canada se développait, le nombre de stations dont il avait besoin augmentait plus rapidement que ne pouvait être prolongé le réseau de premier ordre. Des réseaux et des cheminements de deuxième et troisième ordres ont été établis sur des centaines et des milliers de kilomètres au nord des canevas de premier ordre. Les coordonnées établies étaient désignées NAD27 si le réseau était rattaché au système de coordonnées issu des compensations originales. Ces canevas ont fait et font encore l'objet de révisions, chaque fois qu'ils sont augmentés ou rattachés à un canevas plus précis.

Par suite de l'avènement du matériel MED, des calculateurs électroniques et des techniques de levé par satellite Doppler notamment, des discordances marquées ont été constatées dans les réseaux de premier ordre. Toutefois, comme il fallait conserver une certaine stabilité, ce n'est que dans les régions où les écarts étaient de beaucoup supérieurs aux marges de précision que la Division des levés géodésiques a calculé de nouvelles coordonnées, elles aussi désignées NAD27. Les nouvelles stations étaient alors intégrées dans le réseau environnant.

Les listes publiées des coordonnées maintenues fixes servent actuellement de références à ceux qui ont besoin d'un système de coordonnées stable. Pour des raisons pratiques, de nombreux géomètres et scientifiques considèrent ces listes publiées comme le système NAD27 (par exemple National Academy of Sciences, 1971). C'est également ainsi que l'entend la Division des levés géodésiques du Canada lorsqu'elle répond à des demandes de coordonnées NAD27.

Le projet NAD83

Le NAD83 est un projet international qui a pour but de compenser tous les canevas planimétriques de l'Amérique du Nord en utilisant comme surface de référence un nouvel ellipsoïde géocentrique. Le Canada, les États-Unis, le Mexique, le Groenland et plusieurs pays d'Amérique Centrale y participent.

À la fin des années 1960 et au début des années 1970, on s'est rendu compte que le canevas de premier ordre du Canada comportait plusieurs discordances et qu'en conséquence, il était impérieux de procéder à un rajustement complet de manière à obtenir une précision conforme aux exigences modernes. En 1972, la Division des levés géodésiques a entrepris une évaluation systématique du canevas de premier ordre. La Figure 11 montre les écarts observés. Par suite de ce travail, la Division a renforcé le canevas en y ajoutant des stations à l'échelle et des stations basées sur l'azimut de Laplace puis l'a complété d'un réseau de 170 stations de base Doppler.

D'après les plans actuels, le rajustement NAD83 doit être calculé sur l'ellipsoïde plus universel adopté par l'Union internationale de géodésie et de géophysique à Canberra en 1979, et orienté par des observations de l'azimut de Laplace.

Ce rajustement à l'échelle continentale doit s'achever en 1985; l'intégration des réseaux secondaires suivra immédiatement. On prévoit que les listes complètes des coordonnées des stations de premier et deuxième ordres ne seront prêtes qu'en 1987. Il est néanmoins possible d'estimer les écarts que l'on obtiendra alors.

En ce qui concerne les coordonnées des points du canevas, les écarts absolus entre les valeurs NAD27 actuellement publiées et les valeurs qui seront issues du rajustement NAD83 atteindront environ 100 mètres sur la côte ouest et 70 mètres sur la côte est (expansion apparente de NAD83 comparativement à NAD27). Par contre, les différences seront faibles en Ontario. La Figure 12 illustre les écarts sous forme de vecteurs. En ce qui concerne les coordonnées des réseaux secondaires, les écarts n'ont pas encore été analysés et pourraient différer sensiblement de ceux que l'on prévoit pour les stations du canevas de premier ordre.

Déplacement local de la surface de référence

Soit un point dont on connaît la latitude NAD27, ϕ_{NAD27}, la longitude, λ_{NAD27} et la hauteur au-dessus du géoïde, h, il est

possible de calculer les coordonnées cartésiennes 3D par rapport au centre de l'ellipsoïde de référence.

$$X_E = (\nu + h) \cos \phi_{NAD27} \cos \lambda_{NAD27}$$
$$Y_E = (\nu + h) \cos \phi_{NAD27} \sin \lambda_{NAD27}$$
$$Z_E = (\nu \cdot b^2/a^2 + h) \sin \phi_{NAD27}$$

À cette même station, nous pouvons également observer, par satellite Doppler, les coordonnées par rapport à l'origine du système terrestre classique ($X_{C.T.}$, $Y_{C.T.}$, $Z_{C.T.}$). Les équations (2) et (4) montrent que l'écart entre les coordonnées correspondantes équivaudra au déplacement (X_o, Y_o, Z_o) du centre de l'ellipsoïde de référence. Calculé de cette manière, cet écart est désigné sous l'expression "déplacement local de la surface de référence".

$$X_o = X_{C.T.} - X_E$$
$$Y_o = Y_{C.T.} - Y_E$$
$$Z_o = Z_{C.T.} - Z_E$$

S'il n'y avait pas de discordance dans le réseau NAD27 (et si la position déterminée par satellite Doppler était parfaite), le déplacement local de la surface de référence serait le même pour tous les points NAD27. Cependant, à cause des discordances, des variations de quelques dizaines de mètres ont été observées à différents endroits au Canada. Les valeurs moyennes approximatives de ce déplacement de la surface de référence sont:

$$X_o = -15 \text{ m}$$
$$Y_o = 165 \text{ m}$$
$$Z_o = 175 \text{ m}$$

La Division des levés géodésiques du Canada a calculé et représenté graphiquement le déplacement local de la surface de référence en certains points au Canada. Voir les tableaux et graphiques dans l'Appendice D. Ces tableaux peuvent aider à calculer des coordonnées géographiques d'après des observations par satellite Doppler, qui seront conformes (à environ 10 mètres près) aux coordonnées NAD27 locales qui sont publiées. Dans les équations (6) à (8), on utilise des valeurs moyennes de X_o, Y_o, et Z_o calculées à partir de la station la plus rapprochée. S'il est nécessaire d'obtenir une précision encore plus grande, il faut en même temps observer le déplacement local de la surface de référence, comme l'indique l'exemple suivant.

Des techniques ont été mises au point (Lachapelle et Mainville, 1981) pour élaborer un modèle à deux dimensions des écarts entre deux systèmes de coordonnées. Cette technique pourrait servir à calculer des coordonnées NAD27 d'après une position déterminée par satellite Doppler, en tenant compte des relations entre les valeurs connues des positions Doppler et de leurs équivalents NAD27 dans un réseau de points avoisinants.

Exemple numérique

Les calculs ci-après d'un déplacement local de la surface de référence et de l'écart dans le positionnement d'un levé illustrent l'utilisation de ces formules.

D'après la banque des données géodésiques, les coordonnées NAD27 et la hauteur au-dessus du niveau de la mer pour la station géodésique "House" près de Fort McMurray en Alberta sont:

$$\phi_1 = 55° 55' 00{,}48330" \text{ Nord}$$
$$\lambda_1 = 112° 04' 48{,}00740" \text{ Ouest}$$
$$H_1 = 695{,}879 \text{ m}$$

La hauteur du géoïde (niveau de la mer) au-dessus de l'ellipsoïde de référence NAD27, prise à l'échelle à partir de la Figure D4, est de 7,1 m, et la hauteur mesurée du centre électrique de l'antenne réceptrice du satellite Doppler au-dessus du repère était de 2,007 m. Le total de 704,977 m représente la hauteur ellipsoïdale du centre électrique. (Notez que, quoique la hauteur du géoïde prise à l'échelle n'est pas précise, les écarts de positions calculées ne seront touchés que très légèrement si des hauteurs de géoïde régulières sont utilisées pour une zone locale). Les coordonnées cartésiennes dérivées du NAD27 pour la station House sont:

$$X_{E1} = -\ 1\ 346\ 869{,}377 \text{ m}$$
$$Y_{E1} = -\ 3\ 320\ 263{,}362 \text{ m}$$
$$Z_{E1} = +\ 5\ 259\ 639{,}012 \text{ m}$$

Les observations par satellite Doppler nous ont permis d'établir les coordonnées cartésiennes du système terrestre classique pour le centre électrique de l'antenne:

$$X_{CT1} = -\ 1\ 346\ 891{,}72 \text{ m}$$
$$Y_{CT1} = -\ 3\ 320\ 096{,}40 \text{ m}$$
$$Z_{CT1} = +\ 5\ 259\ 814{,}26 \text{ m}$$

Ainsi, le déplacement local de la surface de référence calculé en soustrayant les coordonnées NAD27 des coordonnées correspondantes du système terrestre classique était:

$$X_o = -\ 22{,}44 \text{ m}$$
$$Y_o = +\ 166{,}96 \text{ m}$$
$$Z_o = +\ 175{,}25 \text{ m}$$

Des observations Doppler ont été faites simultanément à une seconde station avoisinante, lorsque les coordonnées NAD27 étaient nécessaires. La solution des équations Doppler, qui nous a permis d'établir les coordonnées du système terrestre classique susmentionnées pour la station House, comprend les observations des deux stations (nommé une transposition (translocation) et donne aussi les coordonnées du système terrestre classique pour la seconde station:

$$X_{CT2} = -\ 1\ 346\ 534{,}95 \text{ m}$$
$$Y_{CT2} = -\ 3\ 321\ 000{,}33 \text{ m}$$
$$Z_{CT2} = +\ 5\ 259\ 820{,}68 \text{ m}$$

Celles-ci peuvent être converties en coordonnées cartésiennes NAD27 en soustrayant le déplacement local de la surface de référence calculé précédemment, soit:

$$X_{E2} = -\ 1\ 346\ 512{,}51 \text{ m}$$
$$Y_{E2} = -\ 3\ 321\ 167{,}29 \text{ m}$$
$$Z_{E2} = +5\ 259\ 645{,}43 \text{ m}$$

Ces coordonnées cartésiennes peuvent être converties en utilisant les équations 9 et 11 pour donner les coordonnées géographiques NAD27 de la seconde station:

$$\phi_2 = 55° 45' 41{,}763"$$
$$\lambda_2 = -112° 04' 09{,}417"$$
$$h_2 = 1104{,}586 \text{ m}$$

Si la hauteur locale du géoïde est soustraite de h dérivé, nous obtenons la hauteur au-dessus du niveau de la mer du centre électrique de l'antenne de la seconde station.

Chapitre 6

Le positionnement au large des côtes

Les positions établies sur les marges continentales doivent être rattachées au système de référence présentement reconnu tel que défini par les stations côtières les plus rapprochées. A l'heure actuelle, ce système est défini dans le Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada comme le Système de référence nord-américain de 1927.

Zones

La zone de couverture des visées optiques

Cette zone couvre la partie du plateau continental située entre la côte et la limite que peut atteindre un signal radio ou optique transmis directement sur une ligne de visées dépourvue d'obstacles et dans laquelle des positions peuvent être établies à l'aide des nombreux systèmes de levés micro-ondes ou optiques. Le positionnement de plates-formes fixes ou flottantes peut s'effectuer avec une précision de deuxième ou même de premier ordre s'il est rattaché au canevas côtier. Les techniques couramment utilisées sur terre (équipement de mesure électronique de distance et théodolites) peuvent également servir à établir la position d'un navire ou d'une plate-forme de forage qui se trouve près de la côte.

La zone au-delà de l'horizon

Cette zone correspond à la partie du plateau continental qui s'étend au-delà de la limite que peut atteindre un signal radio transmis directement sur une ligne de visée dépourvue d'obstacles où certains systèmes de micro-ondes continuent à fournir des mesures fiables en raison du traitement accru des signaux, des canaux d'ondes radio ou d'une puissance accrue. La qualité du signal diminue généralement lorsque les distances dépassent la zone de couverture des visées optiques.

La zone éloignée

Cette zone correspond à la partie du plateau continental et à la partie marginale au-delà de la zone de couverture des visées optiques. Le positionnement à l'intérieur de cette zone exige habituellement l'emploi moins précis de systèmes radio de grande longueur d'onde et de systèmes de navigation. Au large de la côte est du Canada, au pied des Grands Bancs et du Cap Flamand, il est particulièrement difficile d'atteindre une précision suffisante au moyen des systèmes radio courants.

Précision et fidélité

La précision (géographique) absolue de la position d'un point nous renseigne sur les possibilités de rattacher cette position à tout autre point de la surface terrestre. La fidélité d'un système est la précision avec laquelle un système peut relier des points de mesure sur une distance limitée, ou revenir en un point dont la position a déjà été établie. La fidélité est un critère important lorsqu'il faut faire des observations très rapprochées, déterminer la forme du relief sous-marin ou mesurer le cap et la vitesse d'un navire. La précision absolue revêt elle aussi une grande importance lorsqu'il s'agit, par exemple, de dresser la carte du relief côtier ou de connaître une position par rapport à un point ou à un réseau défini par des moyens géographiques. Elle est aussi importante lorsqu'un levé couvre un réseau dont la position a été établie au moyen d'un système différent, ou lorsque l'arpenteur-géomètre effectue un positionnement sur deux ou plusieurs réseaux intégrés.

Pour atteindre la précision absolue, il importe d'éliminer les fautes systématiques, telles les erreurs de mise à zéro des instruments et l'incertitude quant à la vitesse de propagation. En ce qui concerne la fidélité, les erreurs systématiques peuvent être tolérées dans la mesure où elles sont constantes; si ces erreurs varient lentement dans le temps, il nous est alors impossible de retourner à une position préalablement établie. Comme toutes les erreurs systématiques ne peuvent pas être éliminées, la fidélité est toujours supérieure à la précision absolue; il n'en reste pas moins que certains systèmes de navigation faisant appel aux micro-ondes et au positionnement Doppler par satellite ne présentent que de faibles erreurs systématiques et s'accompagnent, par conséquent, d'une précision absolue et d'une fidélité quasi équivalentes.

L'exactitude d'un levé se mesure par rapport à un canevas de référence ou encore à des bornes géodésiques fixes qui définissent, à l'échelle locale, un canevas de référence. Les levés réalisés au large des terres canadiennes peuvent être classés selon les spécifications du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (1978).

Précisions des mesures

La méthode ordinairement utilisée pour évaluer la précision des mesures géodésiques consiste à les répéter plusieurs fois dans des conditions très différentes afin d'éliminer les erreurs systématiques, puis à calculer l'écart type de ces mesures. Une des différences fondamentales entre les levés terrestres et les levés des fonds marins tient du fait qu'il est difficile, en milieu marin, de reproduire une observation à cause des mouvements du navire.

La précision en mer peut s'exprimer par l'écart type des mesures répétées plusieurs fois à la condition que les plates-formes de forage soient maintenues ou stabilisées de sorte que les mouvements des installations soient réduits au minimum. Des estimations de précision sont généralement obtenues en estimant des magnétudes de toutes les sources d'erreur connues, en combinant les erreurs estimées et, si possible, en évaluant l'ordre de grandeur de toutes les sources d'erreurs connues, en combinant les erreurs ainsi évaluées et, si possible, en comparant le résultat aux mesures prises simultanément à l'aide d'un système autonome entaché de sources d'erreurs différentes. Il faut toutefois reconnaître que la plupart des estimations des erreurs que présentent les systèmes de positionnement radio ne sont qu'approximatives; en effet, on ne dispose que très rarement des ressources en temps et en argent que nécessite une évaluation précise. On remarque d'ailleurs que nombre d'estimations d'erreurs tendent à favoriser les intérêts des estimateurs.

Au nombre des modèles couramment utilisés pour analyser l'exactitude des mesures de longueur figure celui qui consiste à répartir les sources d'erreurs en deux groupes distincts: celles qui causent des erreurs indépendamment de la distance et celles qui causent des erreurs directement proportionnelles à la distance. L'écart type (σ_R) d'une distance mesurée s'obtient alors par:

$$\sigma_R = \sqrt{r^2 + (fR)^2} \qquad (17)$$

r, étant l'écart type (exprimé en unités de longueur) des facteurs combinés qui sont indépendants de la distance,

f, l'écart type (exprimé sous forme de rapport) des facteurs combinés qui varient en proportion de la distance,

R, la distance.

Lorsque des mesures sont prises sur terre ou en direction de plates-formes stables qui se trouvent dans la zone de couverture des visées optiques au moyen de systèmes couramment utilisés sur terre, r et f augmentent considérablement la valeur de σ_R. C'est également vrai des systèmes hydrographiques à deux distances lorsque l'on applique au signal une vitesse arbitraire et uniforme. Aussi, a-t-on accepté une valeur de f = 1/10 000 comme estimation raisonnable de l'écart type des sources d'erreurs combinées qui varient en fonction de la distance. Cependant, si on lui apporte des corrections en tenant compte des propriétés de l'air et de l'eau mesurées sur le parcours du signal, le facteur proportionnel n'a que peu d'effet sur la précision globale des systèmes actuellement utilisés.

Il existe plusieurs façons d'exprimer l'exactitude des mesures. Fondée sur la distribution normale des erreurs, loi de Gauss, la déviation-type mesure la dispersion des observations (Voir Tableau III). Dans les cas des mesures répétées d'une quantité, il s'agit de la racine carrée de la somme des carrés des résidus déduits de la moyenne, divisée par le nombre de mesures diminué de un.

Bien que les systèmes de mesure ne produisent pas des mesures tout à fait conformes à la distribution théorique des erreurs, la théorie nous permet d'obtenir une approximation suffisamment proche de la réalité pour que nous puissions nous en servir dans l'analyse des erreurs. Prenons un exemple précis. Les systèmes de positionnement radio ou les systèmes MED s'accompagnent généralement d'une proportion d'erreurs importantes légèrement supérieure à ce que prévoit la théorie. Théoriquement, la probabilité qu'une mesure soit entachée d'une erreur supérieure à l'écart type (au niveau 1σ) est 33 p.cent; par contre, la probabilité que l'erreur dépasse le niveau 2σ n'est que de 5 p.cent. Ce niveau est couramment employé pour exprimer la précision des systèmes hydrographiques, car il correspond mieux à la croyance populaire selon laquelle la précision serait l'erreur maximale à laquelle on peut s'attendre.

Exactitude de la position

L'exactitude de la position que l'on obtient par rapport au canevas côtier au moyen des divers systèmes de levés ou de navigation repose dans une large mesure sur le genre de système utilisé. Ces systèmes sont essentiellement de trois types:

A. Ceux par lesquels une position s'obtient en mesurant les deux distances qui séparent le mobile de deux stations côtières; ils prennent le nom de distance-distance si le signal est émis par la station maîtresse montée sur le navire et retransmis par les deux stations côtières esclaves à la station maîtresse, ou de "rho-rho" si le signal est transmis, depuis les stations côtières, à un récepteur qui se trouve à bord du navire.

B. Les systèmes hyperboliques par lesquels une position s'obtient en mesurant les différences de distance (ou de phase) entre des signaux émis aux extrémités de deux lignes de base séparant des stations côtières.

C. Ceux dont le principe consiste essentiellement à calculer indirectement des différences de position au moyen de mesures non linéaires telles que le déplacement Doppler des fréquences connues et des accélérations.

TABLEAU III

Distribution normale des erreurs (loi de Gauss)

Expression de la précision	Niveau d'erreur	(en %)*	Remarques
Deux Sigma	2σ	95	Quelques erreurs seulement sont plus grandes
Un Sigma, Std. Écart type, EQM	1σ	67	Parfois une façon erronée d'exprimer la précision
Erreur moyenne	0.80σ	58	Les erreurs sont pour la plupart inférieures à la moyenne
Erreur probable	0.67σ	50	Il est possible que l'erreur n'excède pas le niveau d'erreur

*Probabilités d'obtenir une mesure entachée d'une erreur inférieure au niveau d'erreur

La plupart des systèmes hydrographiques peuvent fonctionner en mode A ou B; la précision de positionnement obtenue repose alors non seulement sur l'exactitude des distances ou des différences de distance mais aussi sur la géométrie du point observé. Les systèmes de type C sont bien représentés par le United States Navy Navigational System (également appelé système de navigation par satellite Doppler, Navsat ou Satnav) et par les systèmes de navigation par inertie. En ce qui concerne ces derniers, l'exactitude de la position obtenue varie selon les techniques et méthodes employées.

Dans la plupart des systèmes, l'exactitude d'un positionnement diffère généralement selon la direction adoptée. Par exemple, pour la majeure partie de la superficie couverte par un système à deux distances (distance-distance ou rho-rho), l'incertitude minimale se situe dans la direction de la paire de stations côtières et l'incertitude maximale dans le sens perpendiculaire à l'incertitude minimale (Figure 18). Pour illustrer l'exactitude du positionnement, on se sert d'une ellipse dont le demi-grand axe et le demi-petit axe correspondent respectivement aux écarts types maximal et minimal. Cette ellipse porte alors le nom d'ellipse des écarts types. Dans le cas d'un système

à deux distances, on peut calculer en gros la valeur du demi-grand axe a de l'ellipse des écarts types au moyen de l'équation suivante:

$$a = \text{cosec } \beta \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \qquad (18)$$

où:

σ_1, et σ_2 représentent les écarts types correspondant aux deux distances, et β l'angle d'intersection des signaux. Si $\sigma_1 \simeq \sigma_2 = \sigma$, on obtient:

$$a = \sqrt{2}\, \sigma \text{ cosec } \beta \qquad (19)$$

Au moyen de ce modèle, la Figure 18 montre que, pour différentes longueurs de la ligne de base et divers angles d'intersection, un système de navigation à deux distances perd en précision à mesure qu'augmentent les distances.

L'ellipse des écarts types est donc une aire constituée autour de la position jugée la plus probable après les calculs et qui a 39 chances sur 100 de contenir la véritable position: on suppose alors que les écarts types des mesures définissent dans une mesure valable, les différences entre les mesures et les valeurs réelles recherchées. Si on multiplie la dimension des axes par un facteur de 2,45, cette probabilité passe de 39 à 95 p.cent. C'est d'ailleurs sur ce niveau de probabilité que le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (*Spécifications pour levés de contrôle et recommandations sur la construction des repères* (1978) fonde toute sa classification des précisions. Le Tableau IV montre les diverses valeurs que prend la probabilité d'un positionnement lorsque l'on multiplie par divers facteurs la dimension des axes de l'ellipse des écarts types.

Certains programmes de compensation, tels que GALS (McLellan, 1970), prévoient un mode de structuration qui produira diverses dimensions pour l'ellipse des écarts types, selon les précisions attribuées aux mesures et la structure du réseau. Ainsi, pour analyser ou classer un point de rattachement, une méthode plus rigoureuse et plus descriptive que celle que nous offrent les équations 17 ou 18 peut être fournie étant donné que l'on connaît la forme et l'orientation des valeurs des écarts. Il ne faut cependant pas oublier que ces deux méthodes s'appuient sur la précision des mesures estimées et sur le degré de corrélation qui existe entre ces mesures.

TABLEAU IV

Variations de la probabilité selon la dimension de l'ellipse des écarts types

Facteurs multiplicateurs des dimensions de l'ellipse des écarts types	Probabilité pour l'ellipse des écarts types de contenir la position exacte d'un point observé (en %)
2,45	95
2,00	86
1,00	39
0,80	28
0,67	20

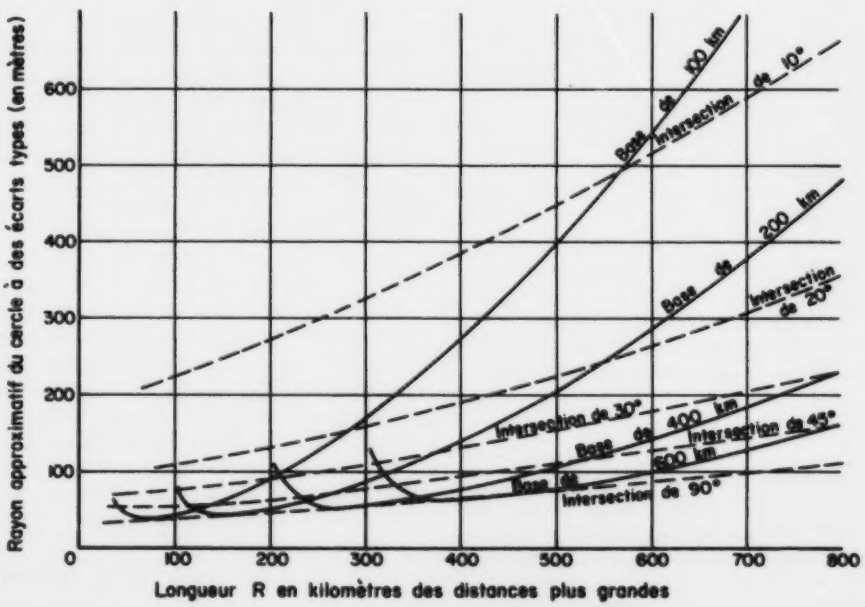


Figure 18
Précision de positionnement d'un système type de navigation à deux distances

Chapitre 7

Les systèmes terrestres de positionnement par radio

Classification

Les systèmes de radionavigation fonctionnent dans des bandes étroites du spectre des fréquences indiqué dans la Figure 19. Ils sont groupés selon leur fréquence d'émission, à savoir très haute fréquence (micro-onde), moyenne fréquence (MF), basse fréquence (BF) et très basse fréquence (TBF), car ce critère détermine la portée, la précision et la dimension de la station émettrice côtière et, de ce fait, le coût du matériel. Pour obtenir la portée requise, il ressort du tableau V qu'il faut employer une fréquence d'autant plus basse que le navire est éloigné de la côte; comme la précision diminue avec la distance, il faut recourir à des émetteurs plus encombrants et plus puissants.

Pour un groupe de systèmes donnés, la différence de rendement entre des systèmes construits par différents manufacturiers est généralement faible. Les prix, les fournisseurs et les caractéristiques facultatives changent chaque année à mesure que surgissent de nouveaux concepts. Une liste détaillée de ces caractéristiques figure dans *The Position Finder* écrit en 1971 par C.B. Jeffery et A.G. Andrews et dans *Positioning Systems* écrit en 1977 par R. Adm. R.C. Munson.

La précision des systèmes faisant appel aux basses fréquences est moindre notamment parce qu'il est difficile sur le plan technique de mesurer plus petit qu'un centième de longueur d'onde, et aussi parce qu'il est plus difficile d'évaluer la vitesse moyenne de propagation d'une onde radio sur une longue distance. Deux raisons justifient l'accroissement de la dimension et de la puissance du système : d'une part, le signal doit parcourir une plus grande distance, et, d'autre part, une onde radio ne peut se propager efficacement que dans la mesure où elle est émise par une antenne dont la hauteur égale au moins le quart de la longueur d'onde. Les antennes plus courtes exigent un apport de puissance supplémentaire. Un système à moyenne fréquence qui fonctionne à 2MHz a une longueur d'onde de 150 m ; une antenne de 10 m (1/15 de longueur d'onde) est donc très peu efficace. Le tableau V attribue des valeurs types à la fidélité des mesures de distance au niveau 2σ, mais n'indique pas l'exactitude du positionnement. Les valeurs correspondant à l'exactitude des points positionnés sont généralement beaucoup plus élevées que les chiffres représentant l'exactitude des distances, selon les angles d'intersection de ces distances et les caractéristiques du système du positionnement. Les valeurs représentant la précision des distances sont pour leur part plus élevées que les valeurs relatives à la fidélité des distances et varient selon le soin apporté à l'étalonnage et aux autres critères de mesures qui influent sur la vitesse de propagation du signal.

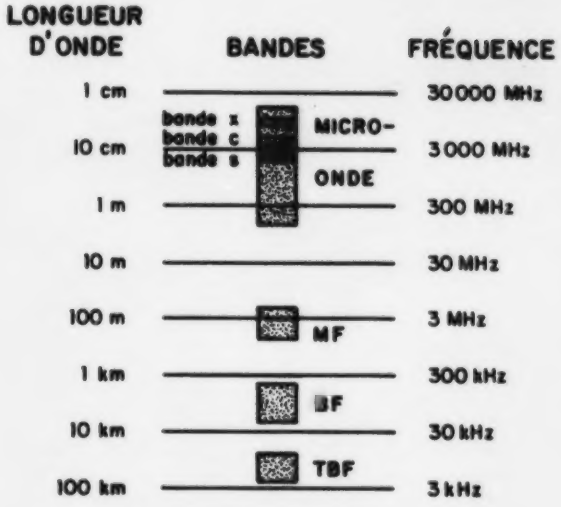


Figure 19
Bandes de fréquence employées en navigation

Modes de fonctionnement

Distance-distance

Les signaux émis par un émetteur de bord sont transmis à deux ou plusieurs transpondeurs (ou stations émettrices esclaves) au sol et retransmis à un récepteur qui se trouve sur le navire. Une fois mesurée, la durée du trajet aller-retour de l'onde de radio est convertie en distance et deux de ces distances définissent la position du navire comme le point d'intersection des cercles formés par les ondes. Il s'agit de la méthode la plus précise en raison de la géométrie rigoureuse du réseau de cercles qui s'entrecoupent. Le nombre de navires pouvant utiliser simultanément les mêmes stations côtières est limité à un seul pour certains systèmes et peut aller jusqu'à un maximum de quatre pour d'autres systèmes qui fonctionnent en temps partagé. Les systèmes à micro-ondes sont toujours utilisés en mode distance-distance; il peut également en être ainsi de la plupart des systèmes en MF et en BF. Si on veut être rigoureux, on peut dire que la seule faiblesse de ce système réside dans l'impossibilité de contrôler le réseau alors que dans les systèmes hyperboliques ou rho-rho, on peut contrôler le réseau et ainsi détecter les modifications des corrections de zéro et autres erreurs systématiques.

Rho-Rho

Le navire ne transporte qu'un récepteur. Les transmetteurs au sol et le récepteur de bord sont contrôlés par des horloges à résonnance atomique très précises. Lorsque la déviation de fréquence, soit le taux différentiel des horloges, entre les normes des fréquences au sol et de bord a été calculée et justifiée, le récepteur de bord ne manifeste aucun changement de phase tant que le navire demeure en place. Tout changement de phase correspondant au déplacement du navire peut être converti en un changement de distance; il suffit de l'ajouter à la distance mesurée au cours de la synchronisation pour obtenir la

TABLEAU V

Méthodes de positionnement au large des côtes

Système représentatif	Mesure utilisée	Portée	Fidélité (niveau 2 σ)	Station côtière	Coût approximatif (1982)	Caractéristiques
MICRO-ONDES (COUVERTURE LOCALE)						
Trispondeur et Autotape	Coïncidence des impulsions Comparaison des phases	50 km à une hauteur suffisante pour la visibilité	10 m 2 m	Transmetteur de 10 kg Batterie de 30 kg Antenne de 10 cm	A partir de 80 000 $ 120 000 $	Extrêmement précis. Étalonnage minimal. Facile à mettre en place et à utiliser. Sans ambiguïté
Syledis	Coïncidence des impulsions Comparaison des phases	300 km	5 m, visibilité, 30 m à plus grande distance	Balise de 16 kg Amplificateur de 47 kg Batteries de 30 kg	150 000 $	Études limitées au Canada, utile au-delà de la visée optique
MICRO-ONDES (COUVERTURE MONDIALE)						
Navigation par satellite Doppler	Comparaison des fréquences Différence des distances	Localisation par intermittence à l'échelle mondiale	240 m (voir système Doppler)		50 000 $	Couverture mondiale. Erreur systématique négligeable. Périodicité des observations: environ 2 heures. La vitesse du du navire doit être connue.
GPS, Navstar	Signal horaire Pseudo-distances	Localisation continue mondiale	10 m (à l'étude)			A l'essai; disponibilité partielle seulement de la constellation satellite.
FRÉQUENCES MOYENNES						
Hi-Fix	Comparaison des phases Distance ou différence des distances	300 km (moindre la nuit)	10 m	Transmetteur 100 kg Générateur de 100 kg Antenne de 10 à 30 m	300 000 $	Très bonne précision relative. La précision géographique exige un étallonnage minutieux. Grave problème d'ambiguïté.
Hi-Fix/6	Comparaison des phases Distance ou différence des distances	300 km	10 m	Transmetteur de 50 kg Antenne de 10 à 30 m Générateur	300 000 $	Étalonnage requis; grave problème d'ambiguïté.
Argo	Comparaison des phases Distance ou différence des distances	400 km	5 m	Transmetteur de 30 kg Antenne de 30 m Générateur	300 000 $	Possède une certaine possibilité d'identification des voies, étalonnage requis.

TABLEAU V (suite)

Méthodes de positionnement au large des côtes

Système représentatif	Mesure utilisée	Portée	Fidélité (niveau 2 σ)	Station côtière	Coût approximatif (1982)	Caractéristiques
BASSES FRÉQUENCES						
12F Decca	Comparaison des phases Distance ou différence des distances	650 km (moindre la nuit)	25 m	Transmetteur de 300 kg Générateur de 300 kg Antenne de 50 m	300 000 $	Bonne précision relative. Coûte très cher à mettre en place. Étalonnage requis.
Chaîne principale Decca	Comparaison des phases Différence des distances	350 km	40 m	Données non fournies par l'utilisateur	Location des récepteurs	Bonne précision relative. Problème d'ambiguïté. Étalonnage requis.
Chaîne principale Loran-C	Impulsion avec comparaison des phases Distance ou différence des distances	2 000 km	50 m	Donnée non fournie par l'utilisateur	50 000 $ (rho-rho) et 4 000 $ (hyperbolique)	Très longue portée. Un peu moins précis que Decca. Étalonnage requis. Moins ambigu que Decca. D'usage pratique.
Accufix	Impulsion avec comparaison des phases. Distance ou différence des distances.	700 km	50 m		300 000 $	Version inférieure au Loran-C.
TRÈS BASSES FRÉQUENCES						
Omega	Comparaison des phases	10 000 km	500 m	Pour atteindre cette fidélité, le système exige, sur la côte, un appareil de surveillance dans un rayon de 500 km du navire.	20 000 $ (2 récepteurs)	Couverture mondiale N'est actuellement qu'un système d'appoint.
ONDES ACOUSTIQUES						
Transpondeurs sous-marins	Impulsions Distance	10 km	10 m	Transpondeur de 100 kg (mouillé juste au-dessus du fond marin)	50 000 $ (1975)	Très précis. Usage universel. La mise en place et la récupération des transpondeurs nécessitent beaucoup de temps. Très courte portée.
Sonar Doppler	Comparaison de fréquences	Profondeur - de 200 m				Sert à mesurer la vitesse du navire.

distance du mobile par rapport au transmetteur côtier. La géométrie du dispositif est identique à celle que l'on rencontre dans le système distance-distance; toutefois, à la différence de cette dernière, un changement de phase égal à un cycle correspond à une augmentation de la distance d'une longueur d'onde complète, et non pas d'une moitié de longueur d'onde. L'exactitude des mesures est légèrement inférieure à celle du système aller-retour en raison des très petites (quelques parties dans 10^{14}) différences dans la fréquence des horloges atomiques. L'avantage de la méthode rho-rho réside dans le fait qu'elle n'a pas besoin de transmetteur ou de grande antenne sur le navire et qu'elle peut pleinement exploiter le large spectre d'émission qu'offre une antenne plus haute et de ce fait, plus performante. De plus, le nombre d'utilisateurs est illimité. Loran-C, Decca Lambda, Toran et Omega fonctionnent en mode rho-rho, et il n'y a en principe aucune raison pour laquelle d'autres systèmes ne devraient pas en faire autant. Autre avantage : le réseau peut être contrôlé à un récepteur stationnaire au sol.

Systèmes hyperboliques

L'émetteur central est posé sur la côte. L'idéal serait que la station maîtresse soit placée à peu près à mi-chemin entre les deux transmetteurs esclaves de manière que les lignes de base reliant le maître à chacun des appareils esclaves forment un hyperboloïde de concavité dirigé vers la zone visée. Le récepteur de bord mesure l'intervalle de temps écoulé entre l'arrivée du signal émis par la station maîtresse et l'arrivée du signal issu des stations asservies. Afin de ne pas confondre l'origine de chacun des signaux, on leur attribue différentes fréquences (Decca, Raydist, etc.) ou des délais d'émission (Hi-Fix, Loran-C). Les différences de temps sont après coup converties en différences de distance qui apparaissent sur le tracé sous forme de lignes de position hyperboliques. Le réseau peut être contrôlé à une station de réception stationnaire au sol. La géométrie du diagramme est moins accentuée que dans le mode rho-rho, mais le nombre d'utilisateurs est illimité et le récepteur est beaucoup moins onéreux. Tous les systèmes MF, BF et TBF peuvent fonctionner en mode hyperbolique.

Ligne de position

Une ligne de position se définit comme le lieu géométrique des points de la surface terrestre pour lesquels on obtient une mesure constante au moyen d'un système de positionnement par ondes radio. Elle peut se traduire par un ensemble de cercles (système distance-distance), par des hyperboles ou encore par des directions. L'intersection de deux lignes de position donne une localisation ponctuelle.

Modes de transmission

Onde continue

Dans ce mode de transmission, l'onde est émise en continu sur une seule fréquence. Les avantages d'un système de positionnement à ondes continues découle du fait que l'information captée en permanence nous permet d'obtenir, par superposition des cycles, une mesure des plus précises. Dans la superposition des cycles, on mesure l'intervalle de temps qui s'écoule entre les passages à zéro des cycles émis par la station maîtresse et les transmetteurs asservis. Nombre de systèmes à ondes continues sont équipés d'un dispositif de temps partagé grâce auquel l'émission continue de la fréquence de mesure est interrompue pendant un court instant pour permettre la transmission d'une fréquence différente. Cette autre fréquence peut servir à identifier les lignes de position (Hydrodist, Decca, Omega).

Transmission par impulsions

Ce mode de transmission fait appel à de brèves impulsions, ou à des groupes d'impulsions, l'émetteur restant muet la plupart du temps. Il permet de mesurer soit le front avant de l'impulsion (superposition des impulsions), soit un cycle particulier de l'impulsion (superposition des cycles). Cette technique permet d'éliminer l'ambiguïté au niveau des micro-ondes et de la réduire au niveau des basses fréquences; en outre, les problèmes d'interférence attribuables aux ondes ionosphériques sont pratiquement éliminés aux basses fréquences (Loran-C).

Transmission en temps partagé

Ce mode de transmission prévoit l'arrêt de l'émetteur à certains moments pour permettre à un autre émetteur d'utiliser la même fréquence. Il permet à un système hyperbolique ou à une chaîne (distance-distance) employée par de nombreux usagers de fonctionner sur une seule fréquence, diminuant ainsi le coût du matériel, exploitant une plus faible partie du spectre des fréquences et diminuant la susceptibilité aux interférences (Hi-Fix, Omega).

Propagation des ondes radio-électriques

Modes de propagation

Les divers modes de transmission de signaux sont illustrés à la Figure 20. Aux fréquences correspondant aux micro-ondes, le parcours du signal accuse une courbure presque nulle; en d'autres termes, si on ne peut voir le transmetteur, on ne peut recevoir le signal. En rehaussant le signal, les transmissions au-delà de la zone de couverture des visées optiques peuvent être obtenues par certains systèmes. Les ondes directes nous permettent d'obtenir la mesure la plus précise. Dans le cas des systèmes à basses fréquences où le récepteur se situe généralement sous l'horizon du transmetteur, la mesure s'effectue au moyen de l'onde de sol qui suit la surface du globe; le parcours est par conséquent à peu de chose près assimilable à une ligne géodésique. Les ondes ionosphériques et les ondes réfléchies constituent des interférences.

Parmi les systèmes de positionnement radio, il en est un qui reçoit des signaux micro-ondes sur de longues distances, bien au-delà de la ligne de visée, parce qu'il se produit un phénomène de canalisation (ducting) du signal entre les couches de l'atmosphère. Au cours de ce phénomène, les ondes réfléchies par la mer interfèrent soit en renforçant, soit en diminuant l'intensité de l'onde ainsi guidée. Des arpenteurs-géomètres ont signalé l'existence de zones mortes où aucun signal ne pouvait être capté en raison de ces interférences destructives.

Aux moyennes et basses fréquences, l'onde de sol suit la surface du globe, s'élevant dans l'atmosphère à une hauteur correspondant à environ une longueur d'onde; elle pénètre aussi dans la mer par un mètre de profondeur et entre très profondément dans les terres de faible conductivité. Le signal se rend également jusqu'au récepteur grâce aux ondes réfléchies par l'ionosphère. Ces ondes ionosphériques sont particulièrement fortes de nuit alors que disparaît une couche absorbante qui se trouve juste en-dessous de l'ionosphère. En règle générale,

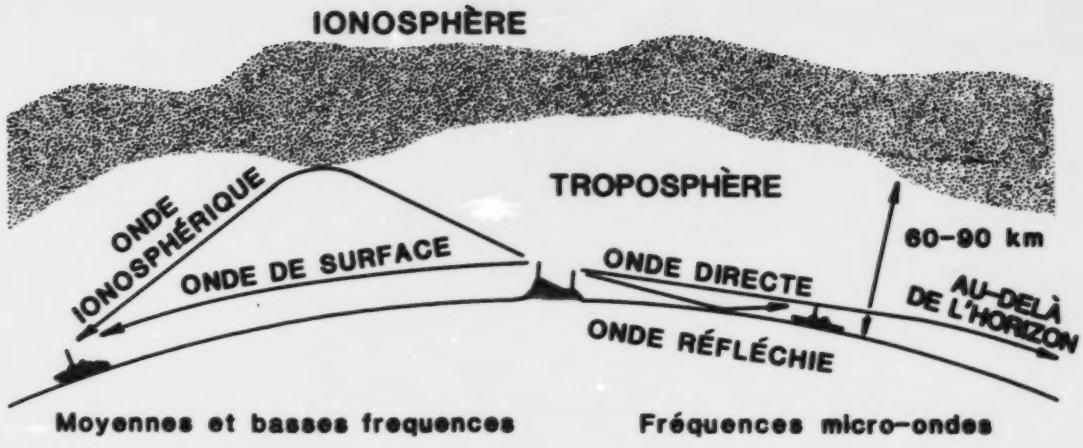


Figure 20
Propagation des ondes radio

l'onde ionosphérique s'accroît en intensité à mesure qu'elle s'éloigne de l'émetteur, tandis que l'onde de surface en perd (Figure 21). Lorsque l'onde ionosphérique gagne une part importante de l'intensité totale du signal, il se produit l'interférence décrite dans le chapitre "Bruits parasites et ondes ionosphériques". Pour régler ce problème, il suffit d'adopter le mode de transmission par impulsions, comme c'est le cas pour Loran. En effet, l'onde de surface, qui a un plus court trajet à parcourir, arrive en premier; si la mesure est prise sur le front avant de l'impulsion, soit avant l'arrivée de l'onde ionosphérique, elle échappe aux effets interférents de l'onde ionosphérique.

Aux très basses fréquences (TBF), le signal émis par le système Omega se déplace dans le conduit formé entre la surface du globe et l'ionosphère et tenant lieu de guide d'ondes. La largeur du conduit varie en raison des variations diurnes que subissent les propriétés de l'ionosphère et qui font diminuer ou accroître l'altitude de la couche réfléchissante; aussi, faut-il parfois appliquer à l'onde ionosphérique des corrections quelque peu imprécises qui peuvent même varier jusqu'à 5 km en 1 heure. Une façon plus précise de calculer la correction à apporter consiste à observer les variations de la couche réfléchissante à une station de réception stationnaire sur la côte la plus proche et à appliquer les corrections correspondantes à un récepteur de bord; cependant, la précision obtenue par la technique de l'Omega différentiel en ce qui concerne la meilleure ligne de position ne sera guère supérieure à ± 500 mètres.

Déphasages primaires

Tous les systèmes de positionnement électronique reposent dans une certaine mesure sur l'intégration dans le temps de la vitesse de propagation du rayonnement électromagnétique dans l'atmosphère. En septembre 1975, l'Union internationale de géodésie et de géophysique recommandait que la valeur de 299 792 548 mètres par seconde, affectée d'un écart type de 1,2 m/s (bulletin géodésique n° 118, décembre 1975), soit adoptée comme la mesure la plus précise de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le vide. Dans le cas des calculs effectués par MED, on emploie généralement la valeur moins précise V_o = 299 792,5 km/s, autrefois admise. La vitesse de propagation dans l'atmosphère (V_e) dépend de l'indice de réfraction η :

$$V_e = \frac{V_o}{\eta}$$

L'indice de réfraction de l'atmosphère varie en fonction de la pression de l'air, de la température et de la quantité des gaz divers dans l'air, par exemple les vapeurs d'eau et le gaz carbonique. Ordinairement, la température sèche, la température humide et la pression totale de l'air sont les trois seuls paramètres mesurés. L'indice de réfraction s'obtient au moyen d'une formule mathématique comme celle qu'ont donnée Essen et Froome (1951). Le retard de transmission du signal attribuable au déphasage primaire est fonction de l'indice de réfraction et varie proportionnellement à la distance. Il faut également signaler que la correction à apporter est indépendante de la fréquence porteuse (voir aussi la section sur le Calcul des déphasages primaires et secondaires).

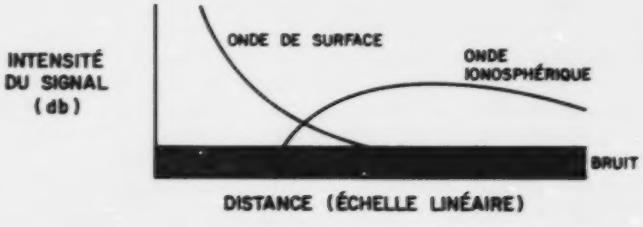


Figure 21
Intensité des signaux en fonction de la distance

TABLEAU VI

Coefficients permettant de calculer les déphasages des ondes de surface pour le Loran-C (100 kHz)

pour: des distances supérieures à 200 m,
permittivité de l'atmosphère, E1 = 1,000 676
lapse vertical de l'atmosphère, α = 0,75
vitesse de référence, c = 299 792,5 km/s
permittivité de la surface, E2 en e.s.u.

Conductivité de surface (Siemen/m)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
				SURFACE MARINE (E2 = 81)					
5.5	2.277	-111.0	98.08	-13.75	112.8	-0.254	0.0	0.00	0.
5.0	2.277	-111.0	98.20	-13.51	112.8	-0.254	0.0	0.00	0.
4.5	2.277	-111.0	98.35	-13.23	112.8	-0.254	0.0	0.00	0.
4.0	2.277	-111.0	98.53	-12.90	112.9	-0.254	0.0	0.00	0.
3.5	2.277	-111.0	98.75	-12.50	112.8	-0.254	0.0	0.00	0.
3.0	2.277	-111.0	99.01	-12.00	112.8	-0.254	0.0	0.00	0.
2.5	2.277	-111.0	99.35	-11.36	112.8	-0.254	0.0	0.00	0.
2.0	2.277	-111.0	99.80	-10.50	112.8	-0.254	0.0	0.00	0.
				SURFACE TERRESTRE (E2 = 15)					
0.03000	2.277	1.9	126.77	43.7	36.9	-0.600	-30.3	13.64	310.
0.02500	2.277	15.4	129.63	43.9	29.2	-0.600	-35.2	14.08	310.
0.02000	2.277	31.0	133.49	45.1	18.4	-0.600	-40.0	14.30	310.
0.01750	2.277	42.1	135.98	45.7	11.0	-0.600	-43.9	14.47	310.
0.01500	2.277	55.7	139.05	46.6	2.1	-0.600	-48.1	14.42	290.
0.01250	2.277	73.6	142.94	47.0	-8.9	-0.600	-54.3	14.13	270.
0.01000	2.277	98.0	148.11	47.0	-24.0	-0.600	-60.8	14.00	245.
0.00750	2.277	133.7	155.47	49.0	-47.0	-0.600	-72.5	13.20	226.
0.00600	2.277	166.0	161.67	49.2	-66.7	-0.600	-83.3	12.67	167.
0.00500	2.277	195.5	167.04	48.9	-83.9	-0.598	-94.3	12.26	151.
0.00400	2.277	236.2	173.89	47.5	-105.9	-0.587	-108.7	10.76	96.
0.00300	2.277	297.1	182.95	48.3	-143.1	-0.556	-127.7	10.42	74.
0.00250	2.277	341.3	188.62	47.5	-163.8	-0.534	-146.4	9.16	56.
0.00200	2.277	402.7	195.13	48.8	-195.3	-0.508	-169.3	8.29	31.
0.00175	2.277	442.6	198.63	51.4	-218.0	-0.496	-183.5	8.02	28.
0.00150	2.277	492.2	202.13	54.3	-236.5	-0.457	-208.2	7.16	21.
0.00140	2.277	515.5	203.43	55.3	-241.1	-0.433	-223.2	6.62	17.
0.00130	2.277	541.1	204.70	57.6	-249.7	-0.415	-237.4	6.36	14.
0.00120	2.277	569.1	205.82	61.6	-263.1	-0.406	-249.3	6.25	13.
0.00110	2.277	599.8	206.75	67.3	-280.2	-0.402	-259.7	6.22	13.
0.00100	2.277	633.3	207.42	75.0	-299.4	-0.400	-271.4	6.30	13.
0.00090	2.277	669.3	207.73	85.3	-319.7	-0.399	-285.7	6.48	13.
0.00080	2.277	707.5	207.58	98.9	-339.9	-0.401	-302.3	6.74	14.
0.00070	2.277	746.5	206.87	118.2	-361.1	-0.409	-316.9	6.97	16.
0.00060	2.277	785.1	205.45	145.8	-382.5	-0.426	-328.0	7.31	20.
0.00050	2.277	819.4	203.26	182.6	-392.5	-0.450	-347.2	7.78	25.
0.00040	2.277	845.8	200.16	216.5	-357.8	-0.473	-401.6	7.58	16.
0.00030	2.277	855.7	196.04	219.5	-217.3	-0.488	-523.4	5.64	7.
0.00020	2.277	832.2	190.58	190.3	-8.7	-0.498	-685.7	5.23	6.
0.00010	2.277	717.7	183.06	164.2	132.0	-0.510	-690.6	7.25	19.
0.00005	2.277	573.3	178.07	158.7	165.4	-0.516	-568.4	9.61	55.
0.00001	2.277	393.6	173.46	155.7	186.4	-0.522	-402.8	11.29	111.

TABLEAU VII

Coefficients permettant de calculer les déphasages des ondes de surface pour le Hi Fix et Argo (1702 kHz) sur l'eau

pour: des distance supérieures à 200 m,
permittivité de l'atmosphère, E1 = 1,000 676
lapse vertical de l'atmosphère, α = 0,75
vitesse de référence, c = 299 792,5 km/s
permittivité de la surface, E2 en e.s.u.

Conductivitité de surface (Siemen/m)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
				SURFACE MARINE (E2 = 81)					
5.0	0.00773	0.1	46.5497	-2.2933	4.6154	-0.5	-4.0968	6.0	0.
4.0	0.00776	2.2	46.7871	-2.7977	3.1919	-0.5	-4.6779	6.0	0.
3.0	0.00766	2.9	47.4754	-2.5022	3.4076	-0.5	-5.5516	6.0	0.
2.0	0.00744	3.1	48.7884	-1.3986	4.5915	-0.5	-6.6647	6.0	0.
1.0	0.00711	6.0	50.8178	-0.5671	4.4715	-0.5	-9.1115	6.0	0.
				SURFACE MARINE BRACKISH (E2 = 80)					
0.75	0.00694	9.4	52.2567	-0.3049	3.5038	-0.5	-11.2025	6.0	0.
0.50	0.00655	12.5	54.1506	0.7259	3.3363	-0.5	-13.7614	6.0	0.
0.25	0.00593	18.0	57.9187	4.2427	4.4423	-0.5	-19.5047	6.0	0.
0.10	0.00461	23.7	62.0038	14.7811	2.0696	-0.5	-31.1729	6.0	0.

Déphasages secondaires

Les ondes radio de moyennes et de basses fréquences qui voyagent à la surface du globe sont modifiées par un deuxième facteur souvent appelé déphasage secondaire. Ce facteur repose sur les propriétés électriques des couches supérieures de la surface terrestre jusqu'à la profondeur de propagation du signal et sur le gradient vertical de l'indice de réfraction. La profondeur de propagation des signaux émis à des fréquences Decca en milieu marin se situent à moins d'un mètre. Le déphasage secondaire qui se manifeste sur une certaine distance est représenté par une fonction non linéaire où interviennent la distance, la fréquence, la conductivité des surfaces, la permittivité de l'air et de la surface ainsi que la courbure de l'onde radio; les trois premiers facteurs sont les plus importants en ce qui concerne les levés au large des côtes.

Les formules et les méthodes décrites par Johler (1956) représentent la méthode acceptée pour calculer le déphasage secondaire sur une surface lisse de fréquence moyenne uniforme (horizontale et verticale). Puisque les équations sont complexes et les calculs très longs, il est habituellement avantageux de remplacer la formule rigoureuse par un polynôme approximatif. P. Brunavs (1977) a développé des polynômes pour remplacer le calcul du déphasage total du Loran-C au-dessus de la mer et de la terre. Le Service hydrographique du Canada a augmenté l'utilisation des polynômes pour inclure le Loran-C au-dessus de l'eau douce et la fréquence Argo au-dessus de la mer. Le polynôme prend la forme suivante:

$$P = \frac{C_0}{S} + C_1 + C_2 \cdot S + (C_3 \cdot S + C_4) e^{(C_5 S)} + \frac{C_6}{1 + C_7 \cdot S + C_8 \cdot S^4} \qquad (20)$$

où: P: Déphasage total (mètres),

C_o, C_1 — C_8 sont donnés dans les tableaux VI et VII pour les fréquences, les conductivités et les permittivités spécifiées.

S = Distance en mètres / 100 000.

Pour les fréquences Loran-C, les polynômes sont valables pour des distances de 3 km à 4 000 km à un précision de mieux de 2,5 mètres en ce qui concerne l'équation rigoureuse donnée par Johler (1956). Pour le polynôme de la fréquence Argo, la précision est de mieux de 1,3 mètre et les distances applicables sont de 2 km à 500 km. L'emploi des polynômes pour les autres systèmes de fréquences moyennes qui se trouvent ailleurs dans la bande de fréquences de 1600 – 2000 kHz résulterait en une perte additionnelle de précision allant jusqu'à un mètre.

Le déphasage primaire utilisé dans les polynômes est l'indice de réfraction de 1,000 338. Pour changer l'indice de réfraction dans le polynôme du déphasage total, il faut soustraire 33,8 de C_2 et ajouter $(\eta\text{-}1) \times 100\,000$ lorsque η est l'indice de réfraction désiré.

- Essais du modèle Johler

Le Service hydrographique du Canada a réalisé plusieurs essais à différentes fréquences en vue de déterminer le déphasage secondaire. Les expériences effectuées en mer au large de la Nouvelle-Écosse en 1973 ont révélé un écart d'environ 5 mètres entre les distances mesurées par Hi-Fix et celles qui avaient été déduites d'observations de levés après corrections pour déphasage secondaire. Les déphasages prévus dans le modèle Johler ont par la suite été confirmés dans le spectre situé entre 1700 et 2000 kHz au-dessus de l'eau au large de la côte de l'Atlantique.

Des essais d'envergure ont également été réalisés dans le golfe Saint-Laurent en 1969 afin d'établir la précision du système Decca Lambda utilisé en mode distance-distance avec des corrections de déphasage (Brunavs et Wells, 1971). Ces expériences ont corrobéré le modèle Johler, du moins pour ce qui est des fréquences Decca Lambda (70 à 170 kHz), dans les conditions qui prévalent sur la côte Est.

Le modèle a également été confirmé dans des condtions d'eaux libres, dans l'Arctique. En avril et août 1973, le Service hydrographique du Canada, en collaboration avec la Division des levés géodésiques et l'Étude du plateau continental polaire (EMR), s'est servi des fréquences Decca pour établir une comparaison entre le déphasage en milieu glacier dans le golfe Amundsen et le déphasage tel qu'il se présente dans des conditions d'eaux dépourvues de glace. A partir des essais effectués au mois d'août sur des eaux libres, on a mesuré les effets du déphasage primaire et secondaire puis déduit la vitesse effective. Le résultat obtenu concordait avec la vitesse observée, ce qui confirmait une fois de plus la validité du modèle Johler en ce qui concerne les eaux libres de l'Arctique (Gray, 1975).

- Conductivité de la surface marine

Le Service des données sur le milieu marin (S.D.M.M.) du ministère de l'Environnement a réalisé une étude statistique portant sur 21 173 conductivités de surface marine mesurées sur la côte de la Nouvelle-Écosse dans le golfe Saint-Laurent, sur les Grands Bancs et sur la côte du Labrador (Forester, 1973). La région à l'étude a été divisée en blocs qui avaient pour la plupart 5 degrés de longitude et de latitude. Des données ont été rassemblées pour chaque bloc et pour chaque mois. Au nombre des statistiques qui furent produites pour chacun des blocs à chaque mois figuraient la conductivité moyenne, l'écart type des observations, les valeurs maximales et minimales observées et le nombre d'échantillons. La Figure 22 nous propose 5 courbes tirées de ces données qui illustrent les conditions moyennes qui règnent au large de la côte Est du Canada.

Trois de ces courbes représentent respectivement la conductivité, la moyenne des conductivités moyennes mesurées pour tous les blocs à chaque mois ainsi que les conductivités moyennes maximales et minimales mesurées pour chacun des blocs au cours d'un mois précis.

Les moyennes maximales et minimales mesurées pour chaque mois doivent être considérées avec prudence parce qu'aucun effort majeur n'a été fait pour éliminer les erreurs parmi ce grand nombre de données. De plus, les valeurs moyennes les plus faibles obtenues pour chaque mois sont indiquées pour tout bloc de la région à l'étude (ce qui correspond à la valeur moyenne moins trois écarts types applicables à ce bloc). L'inverse est également vrai : à chaque mois et à chacun des blocs de la région à l'étude correspond une valeur moyenne maximale (correspondant à la valeur moyenne à laquelle on ajoute trois écarts types). Ces dernières courbes doivent attribuer aux observations un intervalle au niveau de confiance supérieur à 99 p. cent. Les conductivités de surface marine mesurées au large de la côte Est ne devraient dépasser que rarement les limites indiquées par ces deux courbes.

Selon l'étude du SDMM, aucune variation significative n'a été observée entre les différentes régions de la côte de l'Atlantique. Il se peut que cette constatation vienne du fait que les blocs ont été délimités uniquement par leurs coordonnées géographiques. Aucune tentative n'a été faite pour rattacher les limites des blocs au trait de côte ou encore aux limites du courant du Labrador ou du Gulf Stream. Il n'en demeure pas moins que ces courbes sont représentatives des conductivités de la surface de la mer dans les régions voisines de la côte orientale du Canada. Étant donné que cette étude a été réalisée dans une région dominée par de grandes influences perturbatrices (le courant froid du Labrador, les eaux chaudes du Gulf Stream et l'afflux d'eau douce du fleuve Saint-Laurent), il est permis de supposer que la conductivité des surfaces, dans d'autres régions, ne saurait varier dans une plus large mesure.

L'étude des polynômes des déphasages nous renseigne sur l'amplitude des erreurs de distances auxquelles aboutissent diverses erreurs de conductivité. Supposons que la conductivité moyenne est de 3,2 Siemens par mètre (S/m), et que la conductivité réelle se situe entre 2 et 5,5 S/m, soit à l'intérieur de l'intervalle approximatif au niveau de confiance de 99 pour cent indiqué à la Figure 22. Les erreurs maximales, dans le cas de Loran C, seraient alors :

à 10 km, 1 m ou 100 ppm ou 1:10 000
à 100 km, 3 m ou 30 ppm ou 1:33 000
à 1000 km, 11,4 m ou 11 ppm ou 1:88 000.

Les valeurs mensuelles moyennes indiquées à la Figure 22 réduiraient légèrement ces erreurs. Les résultats les plus précis s'obtiennent lorsque les mesures de conductivités sont prises en même temps que les mesures de distance.

Facteurs secondaires additionnels (FSA)

- Trajectoire terrestre

Lorsque des moyennes et des basses fréquences sont transmises de l'émetteur au récepteur suivant une trajectoire terrestre, le déphasage secondaire varie considérablement par rapport à ce qu'il serait si le signal voyageait, sur toute sa trajectoire, au-dessus de la mer. Cette variation tient du fait que les propriétés électriques de la terre ferme diffèrent de façon considérable de celles de la mer. Le déphasage varie selon le type de terrain, (rocheux, boisé, cultivé ou marécageux) et les lacs d'eau douce présentent des caractéristiques électromagnétiques qui leur sont propres. Les variations saisonnières provoquent des modifications très accentuées des propriétés électriques. Aussi, le modèle Johler (1956) est tout à fait insuffisant dans l'estimation du déphasage secon-

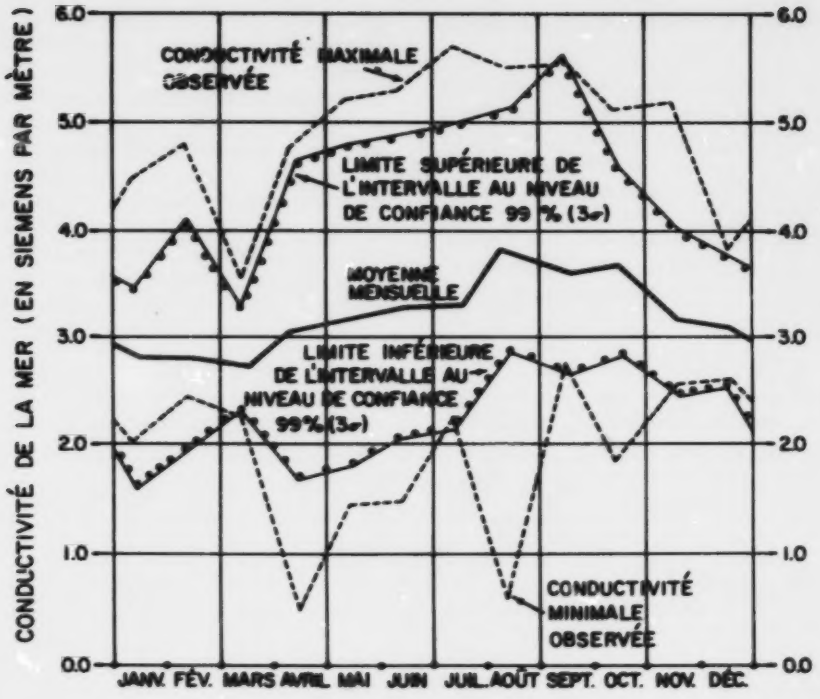


Figure 22
Variation de la conductivité de la surface de la mer au large de la côte est du Canada

daire. Afin d'éviter les trajectoires terrestres, la plupart des transmetteurs utilisés dans les levés au large des côtes ont été installés à proximité de la côte.

Système de positionnement de longue portée, le Loran-C peut fonctionner jusqu'à des distances de 2000 km. Il permet donc d'obtenir une bonne couverture géométrique assez étendue - bien que l'existence de certaines trajectoires terrestres soit inévitable. Depuis quelques années, on observe une tendance à établir davantage de stations Loran-C à l'intérieur des terres, de sorte que le réseau puisse être utilisé tant pour la navigation maritime qu'aérienne.

Cependant, l'intérieur des terres est synonyme de longs parcours sur terre où des plateaux secs succèdent à des forêts pluvieuses. Pour prévoir le déphasage secondaire avec l'exactitude nécessaire aux travaux de levés, il importe d'entreprendre une étude poussée des caractéristiques du déphasage secondaire par rapport à une trajectoire terrestre.

Si le comportement du signal en trajectoire terrestre était constant sur toute la région à l'étude, la correction serait relativement simple à mesurer. Il est toujours possible de comparer une localisation ponctuelle obtenue au moyen de Loran-C à une observation plus précise; toutefois, dans certains cas, la correction varie rapidement. Ainsi, le Service hydrographique du Canada a remarqué que, lorsque l'on s'avance près de l'île Scaterie (pointe est de l'Ile du Cap Breton), la correction à apporter à la distance mesurée par Loran-C jusqu'à Nantucket change de 2,4 microsec (700 m) sur 46 km (25 milles nautiques), à mesure qu'augmente la trajectoire terrestre.

Pour la navigation, les inconvénients des trajectoires terrestres sont minimes en regard des avantages que procurent une bonne géométrie. Cependant, les chaînes Loran-C seront également utilisées pour les levés des fonds marins; aussi, lorsque le moment sera venu, il faudra prendre en considéra-

tion les effets du déphasage secondaire dû aux trajectoires terrestres.

La méthode modifiée de Millington (Bigelow, 1965) servant à déterminer la correction du déphasage secondaire à apporter à des trajectoires composées n'est pas suffisamment précise pour la plupart des relèvements. On peut obtenir une approximation très grossière du FSA ou, si employée avec les FSA observés, la méthode peut fournir une meilleure approximation du FSA au chapitre des observations. Un calcul type de la ligne à la Figure 23 est donné au Tableau VIII.

- Trajectoire au-dessus des glaces de la mer

L'expérience a montré que Decca voit sa précision considérablement réduite s'il est utilisé dans une région couverte de glace. Pendant avril et août 1973, le Service hydrographique du Canada, en collaboration avec la Division des levés géodésiques et l'Étude du plateau continental polaire (EMR), a procédé à des essais au moyen du système Decca afin de déterminer quelles étaient les caractéristiques du déphasage secondaire au-dessus de la glace de la mer et en quoi elles différaient de celles du déphasage secondaire en eaux libres. Posant en postulat que le signal se propage à une vitesse uniforme et qu'il existe un rapport linéaire entre le déphasage secondaire et la distance, Gray a constaté en 1975 une différence d'une partie par 3000 entre la vitesse au signal au-dessus de la glace de la mer en avril, soit $2{,}9951 \times 10^8$ m/s, et la vitesse observée en août au-dessus des eaux libres, soit ($2{,}9961 \times 10^8$ m/s).

La vitesse observée au-dessus des eaux libres a confirmé les valeurs qui avaient été attribuées théoriquement aux déphasages primaire et secondaire en utilisant les propriétés météorologiques et océanographiques observées.

TABLEAU VIII

Calcul type pour la méthode de Millington pour le Loran-C

Distance de l'émetteur km	Conductivité Siemen/m	Déphasage total au début de la section m	Déphasage total à la fin de la section m	Différence du déphasage m
AVANT				
0				
	.001	1499.0	679.2	-819.8
100				
	4.	67.3	219.9	152.6
300				
	.002	978.1	1183.8	205.7
400				
	3.5	307.3	584.9	277.6
700				
			TOTAL	-183.9
RETOUR				
0				
	3.5	1499.0	221.2	-1277.8
300				
	.002	978.1	1183.8	205.7
400				
	4.	305.8	488.3	182.5
600				
	.001	1891.8	2099.3	207.5
700				
			TOTAL	-682.1
			MOYENNE	-433.0

Déphasage total au-dessus de la surface marine de la conductivité 5 Siemen/m = 579,8 – 1499,0 = -919,2 m

Facteur secondaire additionnel = -433,0 – (-919,2) = 486,2 m

= 1,62 microsec

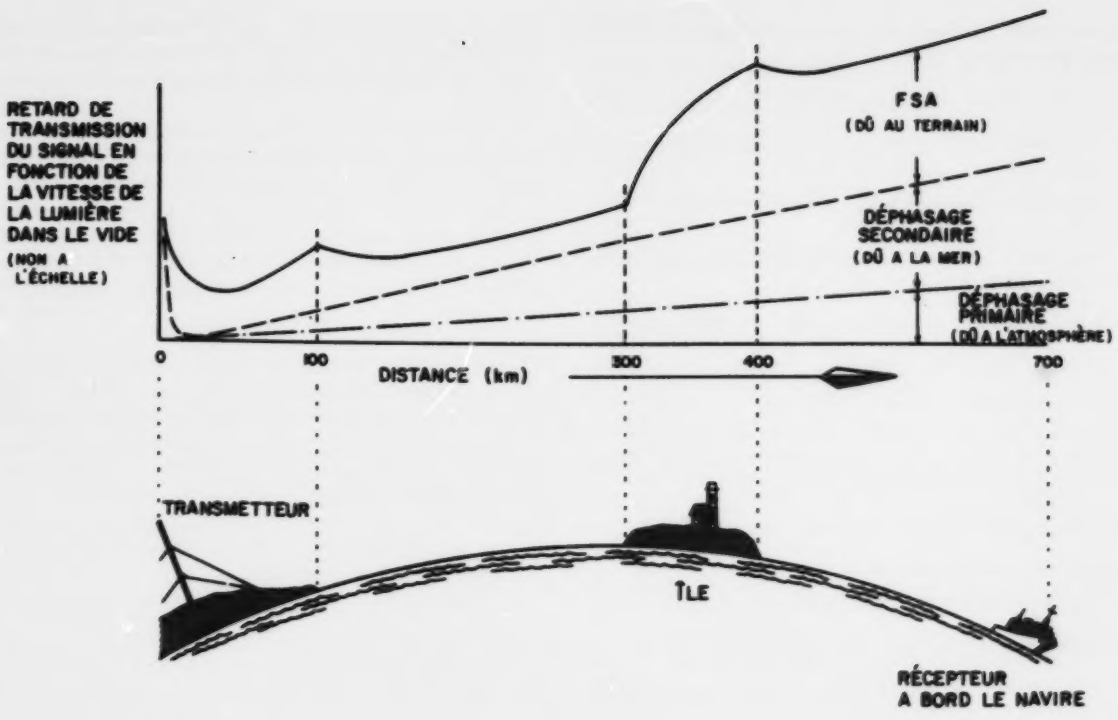


Figure 23
Composantes du déphasage

Dans son rapport de 1975, Gray a démontré une fois de plus qu'aux fréquences Decca (84 à 130 kHz), 2 mètres de glace de la mer suffisent à fausser, dans des proportions importantes, les calculs d'une distance (différence de l'ordre de 1:30 000). L'ampleur de ces effets varieraient, selon l'auteur, en fonction de l'épaisseur et de la conductivité de la glace et ces deux facteurs pourraient varier à l'intérieur d'une même zone d'expérimentation. Cependant, il n'y avait pas suffisamment de données pour établir le modèle lui permettant d'estimer un FSA pour un milieu de glace de la mer.

Plusieurs levés ont été effectués au moyen des fréquences Hi-Fix (1700 à 2000 kHz) sur divers types de glace de la mer de l'Arctique canadien; la portée maximale du système était réduite et, dans certains cas, le signal disparaissait complètement même s'il se trouvait à l'intérieur de la portée normale du système. En outre, la vitesse de propagation subissait des variations notables selon l'épaisseur et l'âge de la glace. En présence d'une petite quantité de glace qui fondait rapidement dans le Northumberland Strait, le Service hydrographique du Canada a constaté une différence d'une partie par 3000 de la vitesse effective. On a enfin constaté que les effets de la glace sur la vitesse de propagation sont beaucoup plus apparents aux fréquences Hi-Fix qu'aux fréquences Decca.

Calcul des déphasages primaires et secondaires

L'indice de réfraction de l'atmosphère qui prévaut aux stations de bord et au sol est facilement mesurable au moyen de baromètres et de thermomètres secs et humides; toutefois, il est possible que la valeur indiquée ne reflète en aucune façon les conditions qui règnent dans l'environnement qui sépare le navire de la côte. Selon la précision réclamée, il peut être nécessaire de mesurer ou d'estimer les conditions qui prévalent sur les distances intermédiaires. Dans le cas des systèmes à micro-ondes, les nomogrammes produits pour les telluromètres s'avèrent particulièrement utiles lorsqu'il nous faut déduire η_{obs} des températures et de la pression mesurées.

Le déphasage primaire incorporé dans les polynômes du déphasage total a été déduit en fonction de l'indice nominal de réfraction $\eta_{nom} = 1{,}000\,338$:

$$\text{Déphasage primaire} = (\eta_{nom} - 1)d \qquad (21)$$

Pour une valeur observée η_{obs}, la valeur C_2 du polynôme doit être corrigée :

$$C_2 \text{ (corrigé)} = C_2 \text{ (nom)} + (\eta_{obs} - \eta_{nom}) \times 100\,000 \qquad (22)$$

Constante de verrouillage

Pour un système distance-distance où les lectures sont

données en chenaux, la formule générale permettant de déduire la distance des chenaux observés est :

$$d = \frac{(n_{obs} - n_L)\cdot\lambda}{2} \qquad (23)$$

où:

n_{obs} = lecture correspondant aux chenaux observés
n_L = constante de verrouillage
λ = longueur d'onde pour la vitesse effective V et la fréquence de comparation f_c, ($\lambda = V_e/f_c$).

Si on utilise les valeurs du déphasage, la formule devient :

$$d = \frac{(n_{obs} - n_L)\cdot\lambda_o}{2} - P_d \qquad (24)$$

où :

λ_o = longueur d'onde pour la vitesse calculée dans le vide ($\lambda_o = V_o/f_c$),
P_d = la valeur totale du déphasage pour une distance d.

En déterminant la constante de verrouillage, nous devons compter le nombre exact de chenaux pour une distance d connue.
Avec les valeurs de déphasage, nous obtenons :

$$n = \frac{2}{\lambda_o}(d + P_d), \qquad (25)$$

et

$$n_L = n_{obs} - n. \qquad (26)$$

Vitesse effective de phase

Lorsque l'on emploie les polynômes du déphasage total, il est utile d'examiner comment les valeurs qui y figurent peuvent être mises en corrélation avec la vitesse effective de propagation d'une onde radio (plus exactement appelée *vitesse de phase*). Supposons qu'à une distance d, la phase du signal réel est décalée de P_d par rapport à celle que l'on obtiendrait si le signal s'était propagé à la vitesse permise dans le vide V_o; la vitesse de phase effective correspondante (V_e) est alors :

$$V_e = V_o\left(1 - \frac{P_d}{d}\right) \qquad (27)$$

Si la trajectoire d'un signal est située directement au-dessus de l'eau de mer, les valeurs dérivées du polynôme du déphasage total constituent une bonne approximation de P_d. Ainsi, pour un signal Loran-C qui se propage dans l'atmosphère dont l'indice de réfraction est de 1,000 338, au-dessus d'une eau de mer de conductivité 3,2 S/m, le déphasage total calculé se situe à 307,5 m pour une distance de 400 km. La vitesse effective correspondante est donc :

$$V_e = 299\ 792{,}5\left(1 - \frac{307{,}5}{400\ 000}\right) = 299\ 562{,}0 \text{ km/s}.$$

Une onde fictive qui se propage à une vitesse constante de 299 562,0 km/s parviendrait donc à la marque de 400 km au même moment que l'onde réelle se propageant à une vitesse qui varie en fonction du milieu qu'elle traverse.

Un simple examen des calculs de déphasage type révélerait que le déphasage augmente constamment lorsque le signal est hors de la portée du champ d'induction; cependant, les vitesses effectives correspondantes sont relativement constantes, ne diminuant que très légèrement à mesure que croît la distance.

La vitesse effective demeurant relativement constante pour chaque gamme de fréquences, il est possible de choisir une valeur approximative pour obtenir les distances à condition que la précision requise ne nécessite pas de l'emploi du polynôme du déphasage. Par ailleurs, pour éviter toute erreur dans l'utilisation de ces polynômes de déphasage, il est préférable d'employer une vitesse effective approximative pour les calculs de vérification.

Variation de la vitesse de référence

Les déphasages proposés dans les tableaux ont tous été calculés en fonction de la vitesse de la lumière dans le vide. La vitesse dans le vide est employée par pure convention et son principal avantage réside du fait que les déphasages sont toujours positifs. Cependant, il s'ensuit que les corrections apportées au déphasage sont représentées par des chiffres assez élevés; aussi, dans certains cas, est-il plus pratique de recourir à une autre vitesse de référence.

La conversion peut s'effectuer de la façon suivante :

$$p' = p - \frac{V_o - V_o'}{V_o} d \qquad (28)$$

où:

p' = déphasage en fonction de la vitesse V'_o,
p = déphasage calculé en fonction de la vitesse dans le vide V_o = 299 792,5 km/s,
d = distance à laquelle se rattachent p' et p.

Exemple :

Pour Hi-Fix, une conductivité de 3,2 S/m et une distance de 100 km, le déphasage p se situe, selon le polynome à 49,7 m.

Pour une vitesse V'_o = 299 650 km/s,

$$p' = 49{,}7 - \frac{299\ 792{,}5 - 299\ 650}{299\ 792{,}5} \times 100\ 000 = 2{,}2 \text{ m}.$$

Si la nouvelle vitesse choisie comme référence était inférieure à 299 650 km/s, un plus grand nombre de déphasages porteraient un signe négatif, de telle sorte que ces distances présenteraient une avance de phase par rapport à la valeur nominale. Il est tout à fait opportun d'attribuer au déphasage des valeurs positives et négatives dans la mesure où on ne commet aucune erreur en les employant dans les formules désirées. En cas de doute, il est toujours possible de vérifier le résultat obtenu en se servant de la vitesse effective qui ne varie pas lorsque la vitesse de référence est modifiée.

La vitesse de 299 650 km/s revêt une importance particulière puisqu'elle sert comme approximation de la vitesse de phase moyenne au-dessus de l'eau. Si on calcule de nouveau les déphasages en fonction de cette vitesse, on constate que cette vitesse convient parfaitement aux fréquences Hi-Fix pour une conductivité moyenne de l'eau d'environ 4 S/m et qu'elle est un peu trop élevée pour la bande de fréquences Decca qui se situe entre 70 et 170 kHz. En effet, à ces fréquences moindres, la

vitesse effective varie entre 299 500 et 299 610 km/s; aussi faut-il conclure que l'adoption d'une seule et unique vitesse de référence donne des résultats moins satisfaisants aux basses fréquences.

Il est certain que les données relatives aux déphasages pourraient servir à trouver une seule et unique vitesse constante pour différentes fréquences du système et pour des distances prévues.

Lorsque l'on a recours à des calculateurs automatiques, le principal critère réside dans la précision et la simplicité de la fonction de déphasage; la vitesse dans le vide V_o s'avère donc plus commode.

Exemples numériques

Aux différents systèmes correspondent différentes équations simples (30) et (31) qui servent à déduire une distance nominale des lectures des instruments. Pour tous les systèmes cependant, lorsque la précision requise le justifie, cette distance nominale peut être corrigée au moyen de l'équation suivante :

$$d = d_n - \{P_d + (\eta_{obs} - \eta_{nom})\, d_n\}, \qquad (29)$$

où :

- d = distance corrigée;
- d_n = distance nominale (calculée différemment selon le système);
- P_d = Déphasage total calculé par rapport à la distance d par le polynôme correspondant à la fréquence, la conductivité et la permittivité;
- η_{obs} = indice de réfraction observé;
- η_{nom} = indice de réfraction nominal utilisé dans les polynômes de déphasages

Hi-Fix

Dans ce système, les lectures sont exprimées en chenaux. Comme le signal parcourt le trajet dans les deux sens, la largeur effective entre les chenaux équivaut à la moitié de la longueur d'onde du signal. La distance nominale s'obtient par :

$$d_n = (n_{obs} - n_L)\,\frac{\lambda_o}{2} \qquad (30)$$

où :

- n_{obs} = lecture du chenal observé;
- n_L = constante de verrouillage;
- λ_o = longueur d'onde nominale pour une vitesse dans le vide ($\lambda_o = V_o/f_c$);
- V_o = vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide;
- f_c = fréquence de comparaison.

Données recueillies sur le terrain :

distance 1, n_{obs1} = 1500 chenaux (constante de verrouillage, $n_L = 0$),
distance 2, n_{obs2} = 2000 chenaux (constante de verrouillage, $n_L = 0$).

Constantes admises :

vitesse dans le vide V_o: 299 792,5 km/s
conductivité de la surface marine : 3,0 S/m
fréquence de comparaison f_c: 1702 kHz
indice de réfraction n: 1,000 338 (correction aux déphasages totaux calculés à partir des polynômes = 0).

Calculs :

largeur nominale du chenal $\lambda_o/2 = V_o/2f_c = 88{,}0707$ m

Par l'équation (30), on obtient :

distance nominale $d_{n1} = (1500{,}0 - 0)\ 88{,}0707$
$= 132\ 105{,}0$
distance nominale $d_{n2} = (2000{,}0 - 0)\ 88{,}0707$
$= 176\ 141{,}3$

Par l'équation 15, on obtient :

Distance $d_1 = 132\ 106{,}0 + 65{,}1 = 132\ 171{,}1$ m
distance $d_2 = 176\ 141{,}3 + 85{,}4 = 176\ 226.7$ m

Loran-C (en mode Rho-Rho)

Dans ce système, les résultats se lisent en microsecondes de propagation. Comme le signal ne voyage que dans un seul sens, la distance nominale s'écrit de la façon suivante :

$$d_n = (L - E)\, V_o, \qquad (31)$$

où

- L = lecture de Loran-C;
- E = retard d'émission = retard de codage + durée de propagation sur la ligne de base;
- V_o = vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide.

Données recueillies sur le terrain :

lecture de Loran-C pour Cape Race $L_R = 50\ 201{,}50$ µs
lecture de Loran-C pour Angissoq $L_A = 3\ 598{,}42$ µs
retard d'émission pour Cape Race $E_R = 48\ 212{,}24$ µs
retard d'émission pour Angissoq $E_A = 0{,}00$ µs

Constantes admises :

vitesse dans le vide V_o : 299 792,5 km/s;
conductivité de la surface marine : 4,0 S/m;
fréquence du signal f : 100 kHz
indice de réfraction n : 1,000 338 (correction apportée au déphasage des tables = 0).

Calculs :

Au moyen de l'équation (31), on obtient :
distance nominale jusqu'à Cape Race
$d_{nR} = (0{,}050\ 201\ 50 - 0{,}048\ 212\ 24)\ 299\ 792\ 500$
$= 596\ 365{,}2$;

distance nominale jusqu'à Angissoq
$d_{nA} = (0{,}003\ 598\ 42 - 0{,}000\ 000\ 00)\ 299\ 792\ 500$
$= 1\ 078\ 779{,}3$.

Par l'équation (29), on obtient :

distance jusqu'à Cape Race, $d_R = 596\ 365{,}2 - 484{,}9$
$= 595\ 880$ m;
distance jusqu'à Angissoq, $d_A = 1078\ 779{,}3 - 950{,}6$
$= 1077\ 829$ m.

Déphasages et systèmes hyperboliques

Dans les systèmes hyperboliques, les corrections apportées à certains déphasages, en plus de constituer une opération pour le moins ennuyeuse, ne justifient que rarement le gain de précision obtenu. Il suffit habituellement d'employer une es-

timation acceptable de la vitesse moyenne compte tenu des conditions particulières.

Précision du positionnement par radio

La précision de tout système de positionnement par radio repose sur deux facteurs :

- L'exactitude de chacune des mesures qui est fonction, entre autre, de la précision de l'instrument, de la connaissance de la vitesse de propagation et du soin apporté à l'étalonnage.
- Le facteur géométrique d'une localisation ponctuelle, ou dilution géométrique de la position, exprime le rapport de l'erreur de position à l'erreur de mesure. Il dépend de l'angle d'intersection des lignes de position et il englobe l'expansion des chenaux ou le grossissement des erreurs des systèmes hyperboliques (voir la figure 24). Au point P, le facteur géométrique est comparable au rapport entre la grande diagonale du losange formé par l'intersection des lignes de position en P et la largeur des chenaux au niveau des lignes de base qui séparent les stations côtières. La figure géométrique que forment les lignes de position qui se coupent dépend de la façon dont les stations émettrices sont situées par rapport à la zone à l'étude; l'arpenteur peut donc, dans une certaine mesure, la modifier à son gré. Une erreur de position, découlant d'une erreur de mesure donnée, est avant tout fonction de l'endroit où se trouve le point observé à l'intérieur de la figure.

Si nous examinons sur les figures en losange formées par le réseau de lignes de position, nous pouvons voir quelle serait l'erreur de position si on commettait une erreur en mesurant un chenal. Dans le cas d'un système hyperbolique (Figure 24), le grand axe de chaque losange représente l'erreur de position qu'on obtiendrait si chaque mesure hyperbolique était trop grande d'un chenal. En revanche, pour un système distance-distance (Figure 25) utilisé à des endroits éloignés des stations côtières, le petit axe du losange représenterait l'erreur de position si, pour chaque distance, on aboutissait à une valeur trop élevée d'un chenal. De toute évidence, ces rapports géométriques s'appliquent également à de plus petites erreurs de mesures commises dans l'ensemble de la région à l'étude.

La figure en treillis indique que, dans la plupart des zones, il existe une direction défavorable à l'exactitude de la localisation. Dans la zone couverte par un système distance-distance, cette direction défavorable est perpendiculaire à la ligne de base dans la partie qui se situe à proximité de la ligne de base et parallèle à cette ligne de base dans la partie éloignée. Dans le cas d'un système hyperbolique utilisé dans une partie très reculée de la zone de couverture, la direction défavorable est celle qui conduit à la station maîtresse.

Dans un système hyperbolique, l'erreur moyenne s'obtient en mesurant la différence de phases à un point P, entre les signaux en provenance de la station maîtresse et des stations asservies, et représente une fraction minime d'une période de chacune des fréquences transmises. Chacune de ces fractions de période peut s'écrire en unités de longueur; il suffit de multiplier les fractions en question par la longueur d'onde du signal approprié. Pour chacune des fréquences émises par les stations asservies, les erreurs moyennes, exprimées en mètres, ne sont généralement pas les mêmes. Toutefois, elles sont suffisamment voisines l'une de l'autre pour caractériser un système.

Si, dans un système donné, les différences de phases rouges et vertes réunies sont entachées d'une erreur de e_m mètres, l'erreur dont sera affligée la mesure de la ligne de

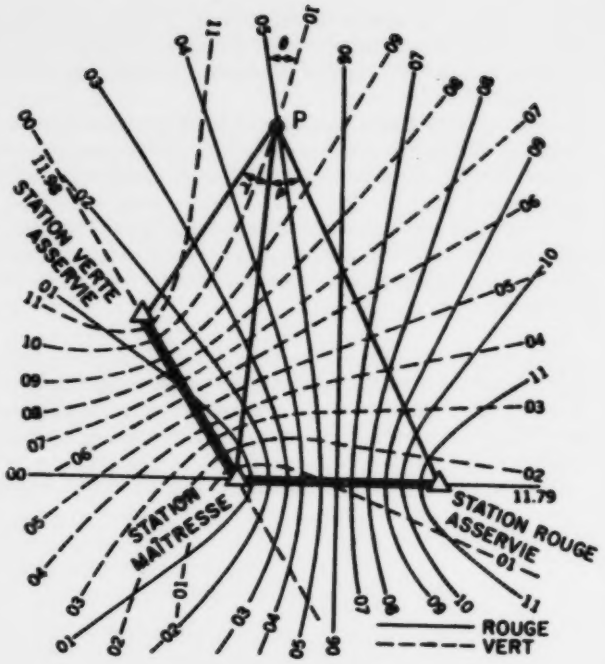


Figure 24
Intersection de lignes de position formant un triplet hyperbolique

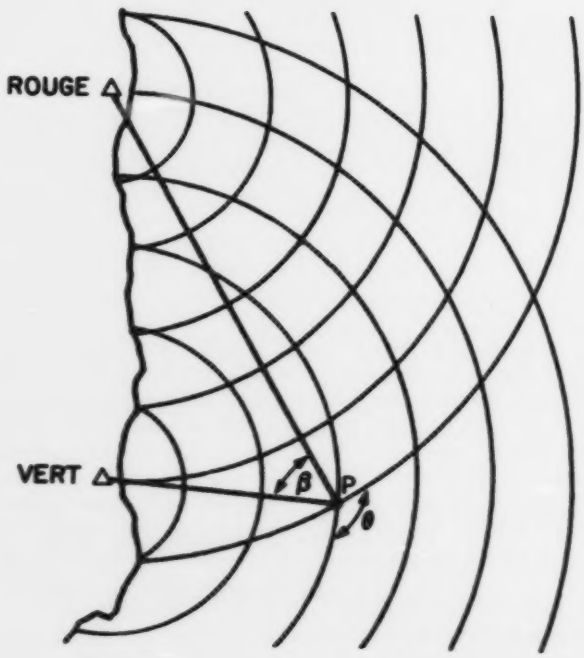


Figure 25
Intersection de lignes de position d'une paire du système distance-distance

position rouge correspondant à un point sur la ligne de base entre la station maîtresse et la station rouge sera égale à e_m mètres. De la même façon, l'erreur dont sera affligée la mesure de la ligne de position verte correspondant à un point situé sur la ligne de base verte sera de e_m mètres. Cependant, dans le cas d'un point P choisi arbitrairement dans la zone couverte par le système, les erreurs, exprimées en mètres, correspondant à chacune des mesures des lignes de position ne sont généralement pas de e_m mètres; ce n'est que sur la ligne de base que la longueur d'onde du signal émis est égale à la distance qui sépare les lignes de position du réseau. En règle générale, on obtient les erreurs de ligne de position, en mètres, correspondant à des erreurs de différence de phases de e_m, tant dans la partie verte que dans la partie rouge, au moyen des équations suivantes :

$$e_R = e_m \operatorname{cosec} \rho/2 \text{ (mètres)}, \quad (32)$$

$$e_C = e_m \operatorname{cosec} \gamma/2 \text{ (mètres)}, \quad (33)$$

où :

e_R étant l'erreur correspondant à la ligne de position rouge,
e_G, l'erreur correspondant à la ligne de position verte,
ρ l'angle sous-tendu par la ligne de base séparant la station maîtresse et la station asservie rouge,
γ l'angle sous-tendu par la ligne de base séparant la station maîtresse et la station asservie verte.

Si les erreurs de mesure correspondant aux lignes de position rouge et verte au point P (Figure 18) équivalent respectivement à e_R et e_G et que l'angle d'intersection des lignes de position en P est θ, l'erreur dont est entachée par voie de conséquence la localisation d_{la} s'obtient par :

$$d_{LA} = \operatorname{cosec} \theta \sqrt{e_R^2 + e_G^2 + 2e_R e_G \cos \theta}. \quad (34)$$

d'après les propriétés d'une hyperbole

$$\theta = (\rho + \gamma)/2. \quad (35)$$

En combinant les équations (32) et (33) et (34), nous obtenons:

$$d_{LA} = e_m \operatorname{cosec} \theta \, (\operatorname{cosec}^2 \rho/2 + \operatorname{cosec}^2 \gamma/2 + 2 \operatorname{cosec} (\rho/2) \operatorname{cosec} (\gamma/2) \cos \theta)^{1/2} \quad (36)$$

Les équations (34) et (36) ne s'appliquent que si les erreurs correspondant aux lignes de position rouge et verte (ou aux différences de phases) sont entièrement mises en corrélation positive; en d'autres termes, une erreur positive importante dans la différence de phase rouge est associée invariablement à une erreur positive aussi importante dans la différence de phase verte. Cette situation a toutefois peu de chance de se réaliser. En temps normal, seulement quelques-unes des sources d'erreurs sont communes aux deux mesures. Il faut donc introduire dans les équations (34) et (36) un terme permettant de tenir compte du degré de corrélation.

En substituant aux erreurs de mesure les écarts-types σ qui leur correspondent et en ajoutant un coefficient de corrélation au terme de l'équation qui fait intervenir les mesures de distance, nous obtenons :

$$d_{rms} = \operatorname{cosec} \theta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_G^2 + k_{RG} \sigma_R \sigma_G \cos \theta} \quad (37)$$

et

$$d_{rms} = \sigma_m \operatorname{cosec} \theta \, (\operatorname{cosec}^2 \rho/2 \operatorname{cosec}^2 \gamma/2 + 2k_{RG} \operatorname{cosec} (\rho/2) \operatorname{cosec} (\gamma/2) \cos \theta)^{1/2} \quad (38)$$

où :

k_{RG} représentent le coefficient de corrélation entre les mesures des différences de phase rouge et verte;

σ_R et σ_G, les écarts types dont sont entachées les mesures des différences de phase rouge et verte;

σ_m, l'écart type moyen des mesures des différences de phases et $d_{rms} = \sqrt{a^2 + b^2}$, la racine carrée de la somme des carrés du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse des écarts types, illustrant l'exactitude de la localisation qui en résulte.

Dans les systèmes distance-distance ou rho-rho, l'angle θ que font les lignes de position au point P (Figure 25) s'obtient de la façon suivante :

$$\theta = 180° - \beta \quad (39)$$

β étant l'angle que forment les lignes de distance qui convergent en P.

Si nous substituons l'équation (39) à l'équation (37), nous obtenons l'expression correspondante à d_{rms} dans un système à deux distances :

$$d_{rms} = \operatorname{cosec} \theta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_G^2 - k_{RG} \sigma_R \sigma_G \cos \beta} \quad (40)$$

où :

σ_R et σ_G étant les écarts types des mesures à deux distances et non plus des mesures des différences de phases ou de distances.

Lorsqu'il n'y a aucune corrélation ($k_{RG} = 0$), l'équation (40) se réduit à l'équation (18) (voir le chapitre 6 sur le positionnement au large des côtes). Si, d'autre part, la corrélation est très étroite et positive k_{RG} se rapproche de 1 et la valeur d_{rms} devient très petite. Étant donné que, dans la majorité des cas, k possède une valeur petite et positive, l'équation 18 peut attribuer une valeur légèrement élevée à l'écart type correspondant à l'erreur de position. La valeur de d équivaut à $\sqrt{2}$ fois le demi-grand axe de l'ellipse des écarts types lorsque le degré de confiance associé à l'exactitude de la localisation est le même dans toutes les directions; en d'autres termes, le demi-grand axe et le demi-petit axe sont égaux. Cette valeur n'est pourtant que légèrement supérieure au demi-grand axe lorsque la longueur des axes diffère largement. Pour la majeure partie de la zone couverte par un système, notamment les zones où la précision est la moindre, d_{rms} constitue une bonne approximation du demi-grand axe de l'ellipse des écarts types.

Le cercle des points d'égale probabilité (CEP) est une expression moins significative quoique fréquemment utilisée; il se définit comme le cercle qui a 50 chances sur 100 de contenir la vraie position. Le rayon du CEP représente une estimation d'erreurs moins rigoureuse et peut parfois donner une impression de précision supérieure.

Courbes de précision

Après avoir estimé les erreurs de lecture de son système, l'arpenteur-géomètre désire souvent trouver les courbes où la précision des points de mesure demeure constante, afin de délimiter les zones qui lui permettront de travailler à la tolérance désirée. Pour ce faire, il peut procéder de deux façons; calculer premièrement les ellipses d'erreurs à un réseau de points au-dessus de la zone à l'étude, puis interpoler, entre ces points, des

courbes de précision ou deuxièmement, tracer des courbes représentant le facteur géométrique de la position ou la dilution géométrique de la position (DGP).

Dans le cas d'un système hyperbolique, on applique l'équation (38):

$$DGP = \frac{d_{rms}}{\sigma_m} = \text{cosec } \theta(\text{cosec}^2 \rho/2 \text{ cosec}^2 \gamma/2 + 2k_{RG} \text{ cosec } (\rho/2) \text{ cosec } (\gamma/2) \cos \theta)^{1/2} \quad (41)$$

Lorsque la station maîtresse et les stations asservies sont indiquées sur la carte, les courbes peuvent être tracées au moyen d'un stigmographe comme le décrit Bigelow (1965). La Figure 26 indique l'allure des courbes de précision dans le cas d'une chaîne Loran-C hypothétique. Au cours de cette opération, le coefficient de corrélation k_{RG} prend la valeur + 1 ou la valeur −1, selon celle qui confère la plus grande valeur à la dilution géométrique de la position; aussi ces courbes représentent-elles la situation la moins avantageuse. Par exemple, si l'écart type des mesures de différence de phases est de 50 mètres, les courbes de la Figure 26 indiquent les endroits où d_{rms} n'est pas supérieur à 250 ou à 500 mètres, la corrélation totale constituant le cas moins avantageux.

Pour un système à deux distances, à partir de l'équation (40), on peut, en en supposant que $\sigma_R = \sigma_G = \sigma$:

$$DGP = \frac{d_{rms}}{\sigma} = 2 \text{ cosec } \beta \sqrt{\sigma_G + \sigma_G^2 - k_{RG} \cdot \sigma_R \cdot \sigma_G \cos \beta} \quad (42)$$

Comme c'était le cas avec le système hyperbolique, on prend comme valeur de k_{RG} + 1 ou −1 de sorte que les courbes obtenues représentent le cas le moins avantageux. Les courbes de précision (Figure 27) sont des cercles qui soustendent un angle constant sur la ligne de base et indiquent les endroits où d_{rms} ne dépasse pas les multiples indiqués de l'écart type correspondant aux mesures. A remarquer l'augmentation rapide de la dilution géométrique de la position à proximité de la ligne de base. L'ellipse de faible précision est assez étroite. Il est possible de maintenir, dans ces courbes, une précision suffisante si un navire les traverse à peu près à angle droit et s'il dispose d'un loch automatique suffisamment précis pour lui permettre de réduire les erreurs plus grandes le long de la route, près de la base. En général, la géométrie que permet d'obtenir le système à deux distances donne de meilleurs résultats qu'une géométrie hyperbolique.

Ellipses d'erreurs

Une autre façon d'établir la précision pouvant être atteinte à l'intérieur de la zone de manoeuvre d'un système à deux distances consiste à calculer les ellipses d'erreurs. Le réseau d'erreurs illustré à la Figure 28, indique les divers niveaux de précision auxquels on parvient au moyen d'un système tel que Hi-Fix basé sur un canevas côtier de faible qualité. Les renseignements concernant ces ellipses s'obtiennent au moyen du programme informatique GALS (McLellan, 1970).

Les premières données à introduire dans ce programme sont:

- la précision relative des points de contrôle exprimée sous forme d'écart type. Dans la plupart des cas, on peut supposer que le canevas n'est entaché d'aucune erreur; néanmoins, dans le cas à l'étude, on suppose que le canevas est peu précis.

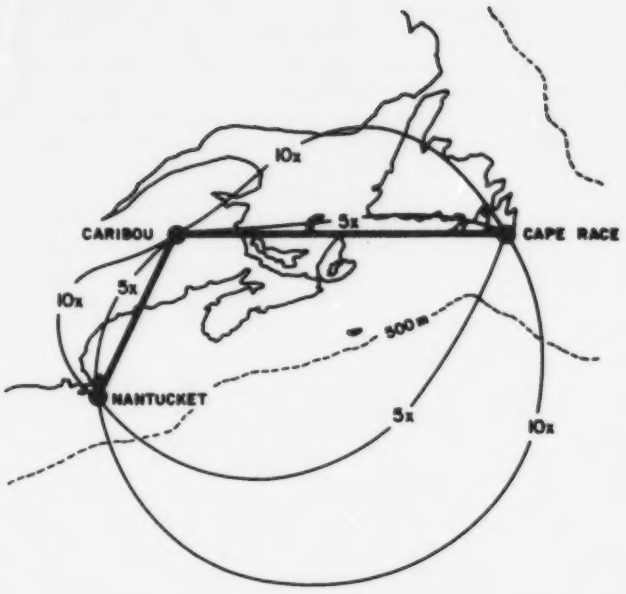


Figure 26
Courbes de la dilution géométrique de la position (DGP) pour une chaîne hyperbolique

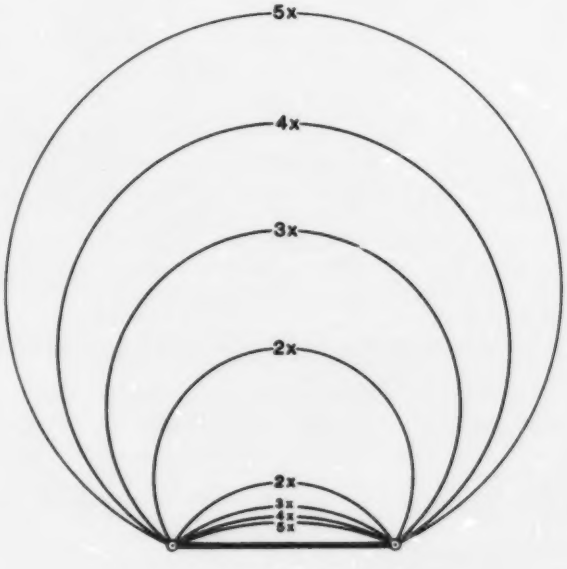


Figure 27
Courbes de la dilution géométrique de la position (DGP) pour une chaîne en mode distance-distance

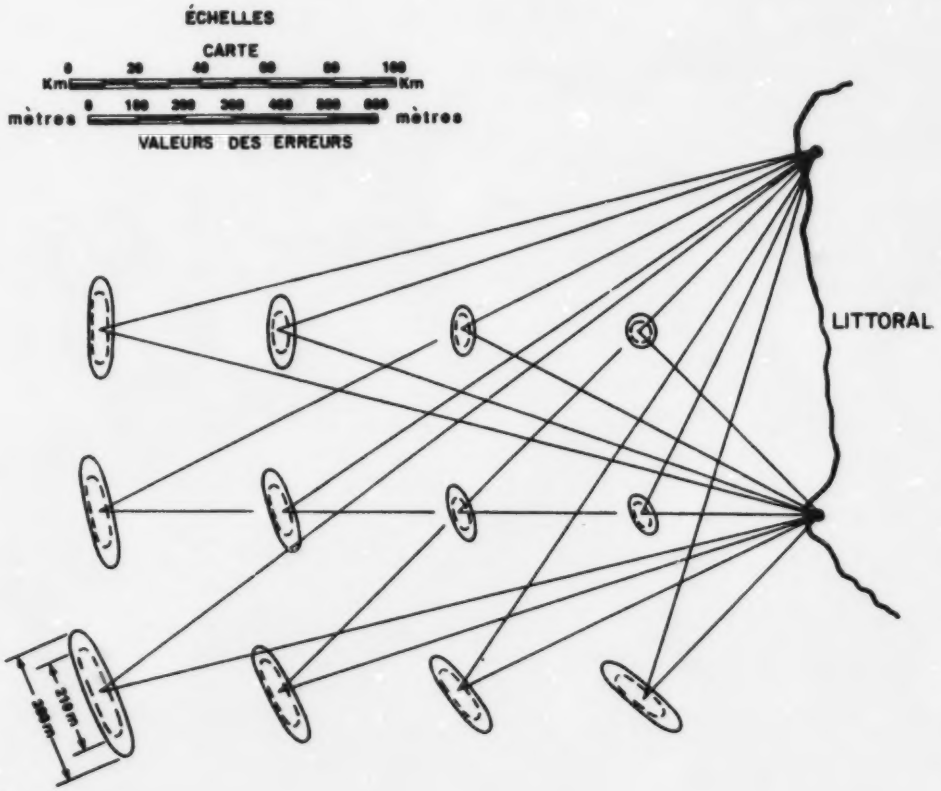
- l'écart type estimé pour chaque mesure de distance; nécessaire pour attribuer un poids à chaque ligne mesurée.
- le lieu géographique approximatif de chaque point de contrôle et les positions autour desquelles il faut calculer des ellipses d'erreurs.

De ces données seront déduits les renseignements qui permettront de créer des ellipses d'erreurs : l'amplitude de l'écart type dans la direction maximale (demi-grand axe), l'azimut de la direction maximale et l'écart type de la direction minimale (demi-petit axe). Étant donné que, par hypothèse, les mesures ne sont pas en corrélation, le programme n'a pas été conçu pour manipuler des coefficients de corrélation. Les chiffres sont légèrement élevés parce qu'on peut s'attendre à ce qu'il y ait une petite corrélation positive. La Figure 28 indique que le grand axe est très long comparativement au petit axe et que le grand axe est perpendiculaire à la droite qui relie le point observé à la station côtière lorsque l'angle d'intersection entre les distances est faible. Cette figure montre aussi que les résultats sont d'autant plus précis que la station côtière est de bonne qualité.

Principales sources d'erreur dans le positionnement radio

Étalonnage pour correction de l'erreur de zéro

Tous les systèmes de télémesure par ondes radio doivent être étalonnés de manière à éliminer l'erreur de zéro. Les systèmes micro-ondes sont habituellement étalonnés entre les stations géodésiques ou sur une ligne de base connue. Les systèmes distance-distance qui font appel à une onde de surface (MF ou BF) et qui prévoient l'utilisation d'une station maîtresse à bord du navire sont étalonnés en fonction de la constante de ver-



Remarques :

1. Les ellipses délimitées par un trait continu sont dérivées d'un canevas côtier dont la précision relative est de 1/2000.
2. Les ellipses délimitées par un trait hachuré sont dérivées d'un canevas côtier dont la précision relative est de 1/11000.

Figure 28
Un réseau d'ellipses de positionnement pour une chaîne en mode distance-distance

rouillage. Pour ce faire, on rapproche le navire du transmetteur asservi, puis on mesure la distance simultanément avec un système à micro-ondes et le système à moyennes ou à basses fréquences. Il faut ensuite corriger les distances obtenues par moyennes ou basses fréquences de manière à tenir compte des effets attribuables au champ d'induction local. Le transmetteur asservi ou le récepteur de bord est enfin réglé jusqu'à ce que les deux distances coïncident.

Par ailleurs, la position du navire peut en même temps être relevée par un système autonome (comme le système de navigation par satellite Doppler) qui n'est pas entaché des mêmes erreurs systématiques. La distance mesurée est corrigée jusqu'à coïncidence avec la distance obtenue au moyen du système d'étalonnage autonome. Si le parcours du signal se trouve en grande partie en milieu terrestre, cette méthode élimine le facteur secondaire additionnel au point d'étalonnage; néanmoins, l'erreur de zéro n'est valable que dans une zone ou la trajectoire terrestre demeure à peu près la même. Si le système autonome en question est un satellite Doppler, il faut effectuer au moins dix comparaisons et établir la moyenne afin d'éliminer les erreurs accidentelles relativement importantes dont s'accompagne un système Doppler. Il faut transformer les coordonnées en un système de référence commun lorsque le positionnement est effectué par satellite Doppler. Dans les systèmes rho-rho, on se sert d'une méthode autonome pour déterminer le moment initial de la transmission. L'horloge atomique montée à bord du navire sert à prévoir le moment où seront transmises les impulsions subséquentes. Les chaînes hyperboliques sont généralement mises à zéro par réglage des stations asservies de manière qu'un récepteur, se trouvant à un endroit connu, montre pour ce point une lecture exacte. Il va de soi que l'erreur absolue attribuable à une mise à zéro erronée a autant d'importance que l'erreur commise dans l'étalonnage; aussi, est-il plus prudent de procéder à des vérifications additionnelles afin de confirmer la mise à zéro initiale. La fidélité des observations demeure inviolée dans la mesure où l'erreur de zéro ne change pas.

Identification des chenaux (périodes)

Tous les systèmes de positionnement radio révèlent un problème d'ambiguïté périodique, sauf les systèmes micro-ondes à coïncidence d'impulsions comme le Trisponder et le Motorola RPS. L'absence de cette ambiguïté constitue un avantage tel que les systèmes micro-ondes de mesure d'impulsions devraient être utilisés chaque fois que leur portée et leur précision le permettent. Pour lever l'ambiguïté à l'aide des instruments, les systèmes de superposition de phases peuvent faire appel à deux méthodes. La première consiste à transmettre une fréquence légèrement différente qui, une fois soustraite de la fréquence fondamentale, forme un diagramme grossier d'identification des chenaux qui possède suffisamment de résolution pour nous permettre de choisir la période appropriée (comme dans le cas des systèmes Hydrodist, Hi-Fix, Decca, etc.). Dans le cas des transmissions par impulsion, une mesure est prise sur le front avant de l'impulsion avec suffisamment de résolution pour identifier, à l'intérieur de l'impulsion, la période particulière (Loran-C). Malheureusement, l'une et l'autre de ces méthodes ne peuvent être employées dans des conditions défavorables (par exemple, présence de bruits parasites élevés, intensité du signal insuffisante). Si un système à coïncidence de phases (Hydrolist, Cubic Autotape) rencontre des problèmes du genre, la longueur d'onde n'étant que de quelques centimètres, la seule solution consiste à améliorer les conditions ambiantes, par exemple en modifiant la mise en place de l'antenne ou en se rapprochant de la station côtière. Cependant, dans le cas des systèmes MF ou BF dont la longueur d'onde varie entre 50 et 5000 m, l'arpenteur peut s'assurer de la bonne période (chenal) soit en se rendant à une position connue, soit en procédant à un relèvement indépendant.

Avec un système hyperbolique, on peut identifier le chenal exact en se servant des points où les lignes de position coupent le prolongement de la ligne de base, l'identité du chenal étant connue sur cette base (Figure 24). En mode distance-distance ou rho-rho, le croisement de la ligne de base entre les foyers ou le prolongement de la ligne de base peut donner une indication d'erreurs car la somme des distances ou la différence des distances dans le cas du croisement du prolongement de la ligne de base doit être égale à la longueur connue de la ligne de base.

L'expérience a démontré que le système de navigation par satellite Doppler détermine la position du bâtiment à partir de laquelle peut être déduite la distance par rapport à un émetteur côtier avec un écart type d'environ 120 mètres. Aux latitudes s'étalant entre 40° et 55°, les passes satisfaisantes du satellite s'effectuent environ toutes les deux heures. Pour calculer le point de mesure, nous devons d'abord mesurer le cap et la vitesse exacts du bâtiment au moyen d'un système de radionavigation qui fonctionne simultanément, le sonar Doppler ou l'azimut gyro, ou tous ces systèmes réunis. Ainsi, en ce qui concerne Decca dont la largeur de chenal est de 300 à 400 mètres, il est probable que le chenal soit correctement identifié dès le premier passage dans 90 p. cent des cas; pour Loran-C évoluant en mode rho-rho, auquel est associée une longueur d'onde de 3 km, l'identification est pratiquement assurée dès le premier passage du satellite. Les observations par satellite Doppler permettent à l'identification d'être vérifiée, où que se trouve le bâtiment et élimine la nécessité de revenir à une borne-repère en station à faible profondeur.

Si on utilise des bouées pour matérialiser une position connue, il faut prendre soin de les mouiller en raidissant les cordages suffisamment pour réduire au minimum le mouvement dû au vent ou aux variations du courant, mais pas trop pour ne pas qu'elles soient balayées par des tempêtes ou des courants forts. Ces considérations limitent à 20 mètres, dans le cas des systèmes à moyennes fréquences (par exemple Hi-Fix), et à 150 mètres dans le cas des basses fréquences (par exemple Decca), la profondeur à laquelle des bouées doivent être mises en place. Dans les eaux de glace, on emploie des mâts en bois qui glissent sous les banquises plutôt que des bouées.

Les transpondeurs acoustiques sous-marins offrent une solution de remplacement aux bouées utilisées comme repères. Bien qu'il soit difficile de localiser un navire avec précision au moyen d'un seul transpondeur, des études de mise au point sont faites en ce sens.

Vitesse de propagation

Tous les systèmes de mesure par ondes radio sont sujets à des erreurs si la vitesse de propagation n'est pas connue avec suffisamment d'exactitude. Dans le cas de systèmes micro-ondes, seul l'indice de réfraction atmosphérique joue sur la vitesse de propagation des ondes, et les distances sont si courtes, en général, qu'on peut utiliser une vitesse moyenne sans craindre de commettre des erreurs appréciables. Pour les systèmes à

ondes de sol à moyenne ou à basse fréquence, la conductivité du sol et d'autres facteurs introduisent un décalage secondaire de phase qui doit être pris en considération et ajouté au déphasage primaire dû à l'indice de réfraction atmosphérique. En milieu marin, il est généralement possible de prévoir avec suffisamment d'exactitude l'importance de ces déphasages. Lorsque le signal se propage au-dessus de la glace ou de la terre, il faut tenir compte des différentes conductivités représentées par le facteur secondaire additionnel (F.S.A.). Malheureusement, en dépit des travaux qui se poursuivent dans ce domaine, il n'est pas possible pour l'instant de prévoir ces corrections avec certitude.

Pour parvenir à des résultats précis, il faut maintenant procéder à un étalonnage minutieux lorsque des trajectoires au-dessus de la terre ou au-dessus de la glace sont mises en jeu. On trouvera davantage de renseignements à ce sujet dans les paragraphes intitulés Déphasage primaire, Déphasage secondaire et Facteur secondaire additionnel.

Bruits parasites et ondes ionosphériques

Les bruits parasites qui introduisent une erreur accidentelle dans la mesure peuvent se définir comme tout rayonnement artificiel ou naturel, autre que le signal de mesure, dont la fréquence se situe à l'intérieur de la bande passante du récepteur. Ces bruits radioélectriques causent habituellement un vacillement égal à deux ou trois centièmes d'un chenal ou d'une période. Certains récepteurs peuvent être dotés d'un dispositif d'amortissement qui permet de réduire l'effet de ces bruits mais un amortissement trop lourd provoque une suroscillation lorsque le navire change de cap ou de vitesse. Si le rapport signal-bruit tombe en dessous des spécifications relatives au récepteur, le vacillement augmente jusqu'à perte totale du signal. Dans les systèmes à moyenne ou à basse fréquence, l'intensité de l'onde ionosphérique parasite s'accroît avec la distance, surtout de nuit, tandis que l'onde de surface perd de son intensité (Figure 21). L'interférence causée par l'onde ionosphérique est souvent à l'origine d'une perte de verrouillage. Les signaux transmis en ondes continues, comme dans Decca, sont davantage enclins à l'interférence ionosphérique que les transmissions par impulsions utilisées, par exemple, dans Loran.

Stabilité des fréquences

Bien que tous les systèmes de radionavigation basent leurs mesures sur ces étalons de fréquence, la précision qui leur est demandée n'a rien de spectaculaire en regard de celle qui pourrait être obtenue. Néanmoins, la précision des systèmes rho-rho repose sur l'aptitude à maintenir, pendant de longues périodes, rythme (décalage de fréquence) constant et bien défini entre deux horloges atomiques et exige un contrôle de fréquence d'un ordre de grandeur de cinq fois supérieur à celui des autres systèmes. Ces décalages de fréquence peuvent généralement être déterminés à environ 0,05 secondes par jour près (1 partie par 10^{13}). Une erreur de cette nature introduit une erreur sur la distance au rythme de 15 mètres par jour, et joue sur la fidélité à long terme de même que sur la précision absolue du système.

Amplitude des impulsions dans les systèmes micro-ondes

Les systèmes à micro-ondes tels que Motorola RPS et Trisponder, qui mesurent le temps de parcours d'une impulsion sans pour autant procéder à une comparaison de phase, ont peut-être tendance à lire trop loin derrière l'impulsion de retour, lorsque l'amplitude du signal est amortie. A des distances extrêmes, ou voisines des limites de portée d'une antenne directionnelle, cette irrégularité produit une distance trop grande et influe sur la précision absolue. Certains rapports indiquent que cet effet se manifeste avant que les lectures affectées de vacillements ne révèlent une perte d'intensité du signal (Eaton, 1981; Casey, 1981).

Traitement des données

Jusqu'à maintenant, l'arpenteur-géomètre établissait un réseau de lignes de positions sur une grille géographique et y indiquait ses prélèvements topographiques par rapport au réseau. De plus, les mesures étaient relevées avec des systèmes manuels. De nos jours, ces réseaux sont tracés par un appareil commandé par ordinateur. Toutefois, la tendance actuelle est de traiter les données entièrement par ordinateur. L'arpenteur-géomètre confie les points extrêmes et les points intermédiaires à un ordinateur qui recueille et compile les données (bien que la compilation puisse être exécutée par une opération distincte), calcule les positions du moment et donne des instructions de navigation soit en actionnant un traceur de route, soit en affichant des corrections à apporter au cap (indicateur de déviation) et la distance à parcourir. Il peut également prévenir le maître d'oeuvre d'un danger éventuel en lui indiquant, par exemple, les points de tir sismique. Le recours à l'ordinateur est presque essentiel dans le cas de systèmes intégrés. Les algorithmes utilisés dans les programmes d'informatique sont généralement complexes et peuvent faire intervenir la méthode des moindres carrés et d'autres techniques statistiques pour optimiser la détermination de la position. A cela s'ajoutent des modèles mathématiques pour le calcul des décalages de phase et des équations géodésiques pour la détermination des positions sur les longues lignes mesurées au moyen des systèmes de positionnement en mer.

Logistique nécessaire à la mise en oeuvre de ces systèmes

Il en coûte environ 100 000 dollars (sans compter les coûts du matériel) pour mettre en place deux stations asservies Decca à basses fréquences en vue d'une utilisation en mode distance-distance, et s'en servir pendant quatre mois. Les transmetteurs à moyennes fréquences, par contre, sont plus légers et n'exigent aucune intervention humaine, sauf qu'il faut prévoir un technicien qui puisse veiller à leur entretien et les réparer dans le plus bref délai lorsque survient une avarie; dans ce cas, le coût de la logistique est moins élevé quoique encore important. Chaque système à micro-ondes nécessite des changemens fréquents de batterie d'accumulateurs, à moins que les transpondeurs côtiers ne soient situés à proximité d'une source d'alimentation fiable.

L'avantage pour un arpenteur-géomètre d'utiliser son propre système réside dans le fait qu'il peut poser les transmetteurs côtiers là où il obtiendra la meilleure géométrie possible au-dessus de la zone où il travaille, évitant du même coup les trajectoires terrestres. Cependant, si la précision réclamée n'est pas trop rigoureuse et qu'on dispose d'une bonne couverture, il peut être avantageux d'exploiter les transmissions gratuites qu'offrent le système de navigation par satellite Doppler ou encore les chaînes principales des systèmes de navigation permanents Decca ou Loran-C. Les chaînes principales Decca ou Loran-C présentent un inconvénient majeur : leurs transmetteurs sont souvent posés à l'intérieur des terres, ce qui fait qu'il

est difficile de prévoir exactement les vitesses de propagation et que l'on obtient une précision relativement faible. En revanche, la fidélité est bonne et le système de navigation par satellite Doppler peut être utilisé pour étalonner le système radio de manière à corriger les erreurs dues à la trajectoire terrestre.

Les systèmes publics de navigation

Le 16 mai 1974, le United States Department of Transportation a annoncé que Loran-C deviendrait, aux États-Unis, l'aide officielle à la navigation dans la zone côtière de confluence. Neuf nouvelles stations ont été construites de manière à couvrir la côte Pacifique de l'Amérique du Nord. Le département des transports a participé, en outre, à la mise en place d'une station en Colombie-Britannique.

Sur la côte atlantique, le département des Transports et la garde côtière américaine exploitent en collaboration une chaîne Loran-C avec station principale à Cariboo dans le Maine et stations asservies à l'île Nantucket et au Cape Race. La zone de couverture de cette chaîne s'étend de Georges Bank à l'extrémité du Grand banc et englobe la plus grande partie du golfe du Saint-Laurent. Le MDT construit actuellement un autre émetteur à Fox Harbour, au Labrador, qui sera une troisième station asservie de la chaîne existante ainsi que la station principale d'une nouvelle chaîne dont les stations asservies seront celles du Cape Race et d'Angissoq au Groenland. La zone de couverture englobera tout le golfe du Saint-Laurent et les Grands bancs ainsi que la plus grande partie de la mer du Labrador. (Voir Figure 29).

Pour la région arctique, il n'existe pas de système radio de navigation exploité par l'état et équivalent à la couverture Loran-C pour les côtes est et ouest. En raison de l'accroissement prévu du trafic, de la taille des navires et de la durée de la saison de navigation attribuable aux projets de mise en valeur du pétrole et du gaz, la Garde côtière canadienne a élaboré une politique concernant la fourniture d'aides à la navigation maritime. Voir l'annexe B pour le texte complet de cette politique tel que présenté lors de l'atelier de 1982.

On ne s'attend pas à ce qu'une couverture Loran-C soit justifiée sauf peut-être pour ce qui est d'une mini chaîne Loran-C pour la mer de Beaufort. Pour la plus grande partie de l'Arctique, on prévoit que les systèmes de navigation par satellite complétés par l'Omega, le radar, le compas gyroscopique, etc., seront suffisants.

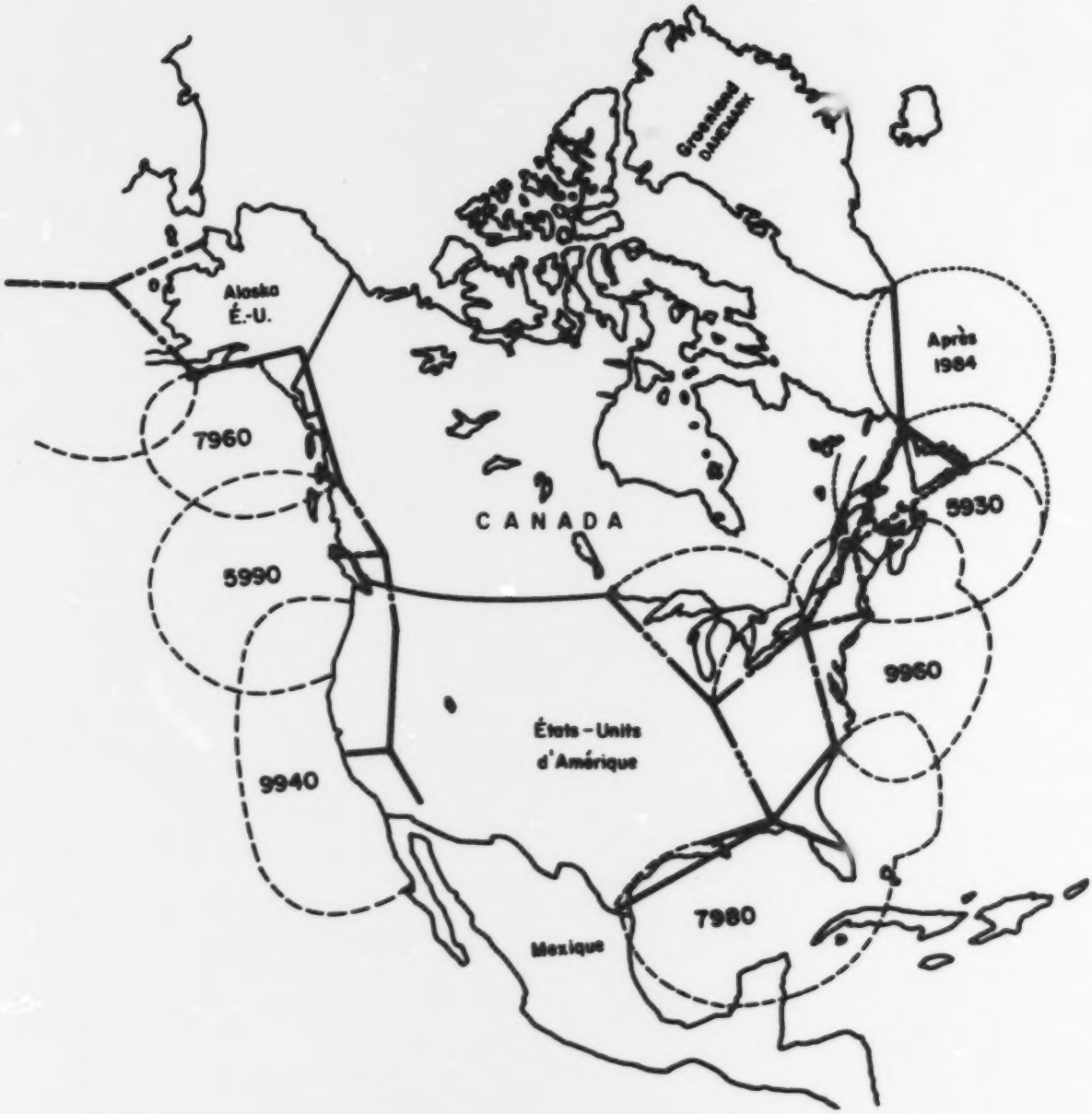


Figure 29
Chaines de navigation Loran-C en Amérique du Nord

Descriptions des systèmes

Systèmes Super hautes fréquences (micro-onde)

Fréquences: 2,000 à 10,000 MHz

Caractéristiques

- Point par mesure de deux distances, sauf "l'Artemis" qui est un système distance-relèvement.
- Propagation directe des ondes.
- Mesures effectuées par coïncidence des impulsions (système apparenté au radar) ou par comparaison de phases (à l'instar d'un telluromètre).
- Haute précision, de l'ordre de ± 5 m.
- Aucune ambiguïté de lecture.
- Portée limitée à la portée optique, mais comportant des "zones mortes" aux endroits où l'onde réfléchie interfère avec l'onde directe.
- Petites antennes.
- Antennes directionnelles aux stations côtières.
- Alimentation de faible puissance.

Systèmes représentatifs

coïncidence d'impulsions
  Del Norte "Trisponder"
  Motorola "Mini-ranger"
Comparaison de phases:
  Cubic "Autotape"
  Tellurometer "MRD 1"
distance-relèvement:
  Huygenslaboratorium "Artemis"

Note: tout système micro-onde peut être utilisé avec un théodolite pour obtenir un point par distance-relèvement, mais seul "l'Artemis" permet une mesure électronique de l'angle.

Portée

La portée de ces systèmes est fonction de la portée optique déduite de l'équation suivante:

$$R = K \{(h_1)^{1/2} + (h_2)^{1/2}\} \qquad (43)$$

où h_1 et h_2 sont les hauteurs des antennes en mètres

$$K = 4{,}13$$

et R est la portée en km

Pour une portée optique donnée, la portée maximale est de 30 km ou plus selon la puissance transmise, les conditions atmosphériques et la puissance du signal qui diminue en fonction de l'augmentation de la largeur du faisceau de l'antenne.

Les signaux réfléchis par la surface de la mer peuvent interférer avec la transmission directe dans les "zones mortes" où le signal devient progressivement plus faible, est entaché d'importantes erreurs de mesure et peut disparaître complètement. Puisque cet effet est observé lorsque les trajets de transmission directe et de transmission réfléchie diffèrent par un nombre entier de longueurs d'ondes, il existe une ou plusieurs zones annulaires centrées sur le transpondeur à terre où le signal est faible. Une surface plane favorise la réflection et le problème a tendance à s'aggraver par temps calme, mais on a observé des zones mortes par mers très houleuses. Une solution efficace à ce problème consiste à modifier la différence entre la trajectoire de l'onde réfléchie et celle de l'onde directe en haussant ou en abaissant l'antenne. Certains systèmes à micro-ondes offrent une option de "diversité dans l'espace" qui consiste en deux antennes placées l'une au-dessus de l'autre et émettant alternativement; l'organe de traitement du signal choisit l'antenne qui donne le signal le plus puissant. Les constructions métalliques peuvent également causer des réflections causant l'affaiblissement du signal.

Le brouillard ou la pluie provoquent également un affaiblissement du signal qui entraîne une diminution de la portée ou des erreurs de mesure. D'autres obstacles comme les arbres, peuvent causer un affaiblissement du signal et des erreurs de distance sans nécessairement entraîner la perte complète du signal.

Un troisième facteur responsable de l'affaiblissement du signal est une orientation incorrecte de l'antenne dans le plan vertical ou dans le plan horizontal.

Exactitude des mesures

Pour un navire en mouvement dans des conditions normales la précision est d'environ ± 7 m (2 σ) pour les systèmes à coïncidence d'impulsions et d'environ ± 2 m (2 σ) pour les systèmes à comparaison de phases dans des conditions de propagation favorables et lorsque l'étalonnage initial a été bien effectué.

Tel que souligné précédemment à l'alinéa PORTÉE, la précision des systèmes à coïncidence d'impulsions a tendance à diminuer rapidement lorsque la puissance du signal tombe sous le seuil critique. On a signalé des erreurs de distance de dizaines et même de centaines de mètres, la distance observée étant toujours plus grande que la distance mesurée.

Les fabricants s'efforcent d'éviter l'introduction d'erreurs attribuables à la faiblesse de la puissance du signal, mais certains organismes responsables de levés exigent l'utilisation d'instruments étalonnés de mesure de la puissance du signal à titre de vérification de l'existence d'un signal d'une puissance convenable pour ainsi valider les mesures de distance.

Les systèmes à comparaison de phase sont probablement moins sensibles aux erreurs de mesure non détectées attribuables à la faible puissance des signaux, mais la levée de l'ambiguïté peut être impossible au moyen de ces systèmes lorsque les signaux sont brouillés ou faibles.

Les systèmes à coïncidence d'impulsions ont tendance à donner d'importantes dispersions des mesures avec pointes occasionnelles de dizaines de mètres à moins que les mesures soient filtrées (lissées). Toutefois l'algorithme de lissage doit être calculé avec soin sans quoi il peut introduire des erreurs comme un décalage constant, une surestimation dans les virages ou une inaptitude à déceler de petites altérations de la trajectoire du navire.

Ambiguïté périodique

Les systèmes à coïncidence d'impulsions sont affranchis de toute ambiguïté tandis que les systèmes à comparaison de phases sont entachés d'ambiguïté lorsque le signal est faible ou bruyant.

Stations côtières

Les systèmes à coïncidence d'impulsions nécessitent de petits transpondeurs (25 cm) protégés des tempêtes, des antennes relativement extensives (ordinairement 75°) et se contentent d'une puissance relativement faible (ordinairement 12 W pendant les mesures et 8 W en état de repos). Une alimentation continue est préférable, mais le transpondeur fonctionne environ 5 jours lorsqu'alimenté par deux accumulateurs d'automobile.

Les systèmes à comparaison de phase nécessitent des unités terrestres plus grosses (45 cm) qui ne doivent être à l'épreuve que des averses et des antennes à faisceaux relativement étroits (ordinairement 25°), leur consommation d'énergie électrique est relativement élevée (ordinairement 50 W).

Avantages et inconvénients

L'équipement moderne est de fonctionnement automatique et offre une gamme variée d'options (voir OBSERVATIONS).

Observations

Un grand nombre d'utilisateurs s'efforcent de mesurer au moins trois distances lorsque c'est possible afin d'éliminer la possibilité d'erreurs grossières. L'équipement moderne permet la mesure non seulement des deux distances nécessaires au minimum, mais de quatre distances ou plus, habituellement à titre d'option supplémentaire. L'équipement ordinaire permet de plus en plus à un certain nombre d'utilisateurs d'interroger presque simultanément le même transpondeur grâce à une disposition automatique d'emploi partagé.

Les stations côtières sont identifiées au moyen de leur code. Lorsque deux stations côtières du même code sont exploitées dans un secteur il y a presque toujours interférence entre les deux, même si l'une d'elle est trop loin pour permettre d'effectuer des mesures. Les premiers systèmes ne prévoyaient que trois ou quatre codes pour un réseau. La tendance actuelle est de prévoir un nombre de codes de plusieurs fois plus élevés.

On peut maintenant se procurer à titre d'option une gamme variée d'enregistreurs et d'organes de traitement des données ainsi que des accessoires de navigation.

La précision des mesures en route ne justifie pas l'application de corrections météorologiques. Le fabricant est responsable de l'application d'une valeur moyenne raisonnable lors de la conversion temps-distance, valeur que l'utilisateur vérifie par étalonnage.

Le mode distance-relèvement n'est généralement utilisé que lorsqu'il est impossible de faire le point au moyen de deux distances (p. ex. au large d'une pointe allongée comme les extrémités E. ou W. de l'île de Sable). Dans le cas de "l'Artemis", pour lequel le fabricant mentionne une précision à 2 σ de $\pm$ 1,5 m, $\pm$ 2 min. d'arc, le relèvement est la moins précise des deux composantes avec une erreur de $\pm$ 1,5 m à 2,5 km et de $\pm$ 15 m à 25 km. Cette précision est soit équivalente à la précision obtenue par deux distances au moyen de l'équipement de coïncidence d'impulsions soit meilleure, mais l'équipement de "l'Artemis" est plus lourd et ne peut être utilisé que par un seul utilisateur.

L'interférence issue du radar à bord du navire dans bande S de 9370 à 9440 MHz peut poser un problème dans le cas des systèmes SHF exploités à des fréquences voisines.

La ligne d'alimentation de certains types d'équipements peut n'être pas pourvue d'un dispositif de suppression des bruits de crête et dans ce cas les accumulateurs ne peuvent être chargés au moyen d'un chargeur ordinaire d'accumulateur pendant que l'on effectue des mesures.

Coût

Dans le cas de l'équipement à coïncidence d'impulsions avec trois transpondeurs, le coût est d'environ 80 000 $ pour un système seul. Le coût des systèmes à comparaison de phases s'élève à environ une fois et demie ce montant.

Systèmes Ultra-hautes fréquences

Fréquences: 420 à 450 MHz

Caractéristiques

- Peut être utilisé en mode distance-distance ou hyperbolique.
- Propagation directe de l'onde plus diffraction et dispersion troposphérique à grande distance.
- Utilisation des techniques d'étalement du spectre afin de produire l'équivalent d'une impulsion de haute puissance et de faible bruit.
- Mesure par corrélation de code.
- Grande précision d'environ ± 5 m pour la portée optique et de ± 10 m à 100 km.
- L'ambiguïté de lecture est de l'ordre de 10 km et doit être levée par l'opérateur.
- La portée diminue par temps froid, toutefois l'expérience actuelle indique un fonctionnement fiable jusqu'à 100 km même pendant l'hiver arctique.
- Antennes de dimensions comparables à celles des antennes de télévision.
- Les antennes des stations côtières sont directionnelles.
- Ne nécessitent qu'une puissance relativement faible.

Systèmes représentatifs

Sercel "Syledis"
"Maxiran"
Transpondeur UFH Del Norte modèle 435
XR Shoran (démodé)

Portée

La portée des transmissions UHF s'étend au-delà de la portée optique jusqu'à 100 km ou plus selon les conditions climatiques. Sous les tropiques on a signalé des portées beaucoup plus grandes. On peut utiliser un amplificateur de puissance mais l'expérience actuelle indique que cela n'améliore la portée que de 20 % environ.

La puissance du signal n'est que peu influencée par le fait que la trajectoire de transmission passe sur terre ou sur mer et les signaux peuvent être reçus dans "l'ombre" des îles ou des falaises, où les signaux SHF seraient perdus.

Exactitude des mesures

Les fabricants mentionnent une précision de l'ordre de quelques mètres à l'intérieur de la portée optique et de 10 m pour une portée de 100 km. Les rapports des utilisateurs ont tendance à confirmer ces données, mais on s'interroge toutefois sur les effets des trajectoires mixtes terre-eau sur la précision. Un étalonnage fiable est essentiel et doit être répété chaque fois que les descentes d'antenne sont changées.

Ambiguïté périodique

Certains systèmes sont entachés d'une ambiguïté d'environ 10 km ce qui fait que l'observateur doit déterminer sa position initiale à 5 km près par autre méthode.

Stations côtières

Les antennes, qui sont d'une longueur d'environ 2 m, sont généralement installées sur une tour de 15 m. Les transmetteurs côtiers sont à l'épreuve de l'eau et leur alimentation nécessite une puissance d'environ 50 W.

Avantages et inconvénients

Comme dans le cas de l'équipement SHF, l'antenne à terre doit être correctement orientée.

Les transmetteurs à bord des navires sont plus puissants que ceux utilisés avec l'équipement SHF et peuvent influencer les radios de bord s'ils ne sont pas bien mis à la masse.

Observations

Au cours des cinq dernières années, l'utilisation des systèmes UHF s'est répandue dans le domaine de l'industrie pétrolière, dans le secteur des levés exploratoires et de la mise en place des pipelines ainsi que dans celui de la navigation pendant la phase d'exploitation. Des chaînes Syledis permanentes ont été installées dans la mer du Nord et le golfe Persique. Au Canada, les UHF ont été utilisées à l'année dans la mer de Beaufort ainsi que sur la côte est.

Par ses caractéristiques le système UHF se classe entre les équipements de positionnement SHF et HF. Il n'est pas limité par la portée optique comme le système SHF et couvre ainsi une superficie environ dix fois plus grande en plus d'être moins sérieusement influencé par les ombres des obstacles. Par comparaison avec les systèmes HF, la transmission sur une étendue terrestre ou sur la glace de mer n'est pas aussi sérieusement influencée et l'ambiguïté de 10 km est un facteur beaucoup moins limitatif que l'ambiguïté de 100 à 500 m du système HF.

La présence d'une inversion atmosphérique peut accroître la puissance du signal par canalisation, mais on a constaté que ce phénomène causait en réalité des erreurs de mesures des distances de l'ordre de dizaines de mètres. Une disposition de deux antennes l'une au-dessus de l'autre dite de "diversité dans l'espace" est utilisée pour minimiser ce problème.

Les systèmes UHF peuvent être utilisés par plusieurs utilisateurs soit en mode distance-distance, soit en mode hyperbolique, soit en une combinaison des deux modes.

Coût

La plus petite chaîne avec trois transpondeurs coûte environ 150 000 $.

Systèmes Moyennes fréquences

Fréquences: 1,5 à 5 MHz

Caractéristiques:

Ce groupe englobe plusieurs systèmes de positionnement de portées moyennes et de bonne précision. La mesure s'obtient au moyen de l'onde de sol à partir de deux transmetteurs côtiers ou plus à l'aide de techniques de comparaison de phases. A ces fréquences, l'interférence causée par l'onde ionosphérique limite la portée au-dessus de l'eau, surtout la nuit. La portée est extrêmement limitée au-dessus des étendues terrestres. Le signal transmis à des fréquences moyennes est davantage exposé à l'interférence atmosphérique que les signaux de basses fréquences. Les transmetteurs d'une chaîne peuvent être en asservissement de phase avec la station maîtresse (Argo ou Hi-Fix), ou encore peuvent fonctionner librement, associés à une station de répéteurs qui transmettent au récepteur les changements de phase entre la station maîtresse et les stations asservies (Principe d'honoré exploité par Toran et Raydist). Les systèmes à asservissement de phase ne fonctionnent que sur une seule fréquence par chaîne. L'Argo et le Hi-Fix utilisent une fréquence additionnelle pour l'identification du chenal. Les systèmes autonomes emploient de nombreuses fréquences ou bandes latérales.

Ces systèmes MF sont principalement utilisés en mode distance-distance mais peuvent être également utilisés pour produire des lignes de position hyperboliques à l'intention des petites vedettes ou des aéronefs à bord desquels il n'est pas possible d'exploiter un transmetteur. En mode distance-distance le nombre des utilisateurs mobiles est limité, ce qui n'est toutefois pas le cas en mode hyperbolique. Il est également possible d'exploiter ces systèmes en mode rho-rho en apportant quelques modifications à l'équipement.

Portée

De jour, la portée au-dessus des étendues d'eau salée est normalement de 400 km (200 milles marins). On a signalé des distances atteignant jusqu'à 800 km et la puissance peut être amplifiée au transmetteur afin d'assurer une réception plus fiable à de grandes distances. La portée maximale de jour dépend de la puissance de sortie, de la longueur des antennes et de la façon dont la station est mise en place, en particulier de la mise à la terre et de la conductivité le long de la trajectoire de transmission. De nuit, cette portée est sensiblement réduite par l'interférence des ondes réfléchies par l'ionosphère.

Exactitude des mesures (niveau 2 sigma):

Dans des conditions favorables, la fidélité du système se situe à ± 10 m pour les parcours au-dessus d'étendues d'eau salée; l'exactitude des distances peut être de trois fois supérieure à ce chiffre selon la distance et les corrections appliquées au décalage de phase. Cette exactitude diminue sensiblement lorsque le signal se propage au-dessus de la glace de mer et d'étendues terrestres. La précision ds positions peut être améliorée par l'utilisation des possibilités de lignes de position multiples de systèmes comme le Hi-Fix et l'Argo.

Ambiguité périodique (chevauchement de chenal):

Il s'agit d'un problème sérieux. Le dispositif d'identification des chenaux que comportent la plupart des systèmes à asservissement de phase peut dans une certaine mesure résoudre ce problème. Toutefois, puisque la fréquence d'identification des chenaux est relativement rapprochée de la fréquence de mesure, elle subit les mêmes instabilités qui causent les chevauchements de chenaux comme l'interférence des ondes réfléchies par l'ionosphère ou les parasites attribuales aux précipitations. Des moyens additionnels d'assurer la bonne identification des chenaux sont généralement nécessaires. On peut utiliser des bouées de référence fixes ou un autre système de positionnement pour la vérification des chenaux. On a utilisé avec succès des techniques statistiques basées sur l'utilisation de multiples lignes de position ou des algorithmes de filtrage des lignes de position.

Installation de la station:

Le matériel de transmission de conception moderne est relativement léger et la source d'alimentation en énergie représente la partie la plus lourde et la plus encombrante de l'installation. On a constaté que des générateurs thermo-électriques, consommant environ 45 kg de gaz propane pour 6 à 7 jours d'exploitation, constituaient une source d'énergie satisfaisante pour les transmetteurs côtiers Argo. Ces générateurs fournissent environ 100 watts au transmetteur. Pour les systèmes MF la hauteur de l'antenne verticale varie entre 10 et 30 m selon la portée désirée. Il faut au sol munir l'antenne d'un réseau de fils métalliques rayonnant de la base de l'antenne. L'utilisation de réseaux au sol plus longs et plus denses que ceux recommandés par le fabricant peut permettre d'améliorer les transmissions aux endroits où la mise à la terre est mauvaise.

L'emplacement doit être choisi avec soin en fonction des critères suivants: Obtenir un bon diagramme géométrique dans la région en cause, éviter les parcours en milieu terrestre et trouver un endroit dégagé et de niveau qui ne comporte aucun obstacle immédiat et qui, de préférence, repose sur un sol propice à une mise à la terre efficace. On devrait également considérer l'aspect sécurité à l'emplacement choisi. Un emplacement élevé améliore la portée, mais peut diminuer la précision à courte distance. La mise en place d'une station nécessite trois hommes et d'une demie-journée à deux jours selon la préparation de l'emplacement et le type d'abri nécessaire pour l'équipement.

A bord d'un navire l'exploitation en mode distance-distance nécessite généralement l'installation d'une antenne fouet de 10 m loin et de préférence au-dessus de tout obstacle. L'obtention d'une bonne mise à la masse ne constitue pas un problème sur un navire en acier. Toutefois, dans le cas des navires plus petits en bois ou en fibre de verre, il est nécessaire d'installer des plaques de mise à la masse sur la coque du navire. En mode distance-distance, on a mesuré des distances de 100 km à partir de vedettes en fibre de verre de 8 m en utilisant 4 "Dyna-plates" pour la mise à la masse. A bord des navires exploitant un système en mode hyperbolique il ne faut qu'une antenne fouet de 2,5 m, un connecteur d'antenne adéquat et une bonne mise à la masse. Dans ce cas également, il est nécessaire

d'utiliser des plaques de mise à la masse sur les navires non métalliques.

Avantages et inconvénients:

Les transmetteurs fonctionnent sans autre intervention, mais les techniciens doivent pouvoir y accéder facilement pour l'entretien et les réparations.

La constante d'étalonnage pour chaque portée ou réseau hyperbolique doit être déterminée avant que l'on puisse utiliser une chaîne.

Les fabricants fournissent des sorties de données pour les dispositifs périphériques. Avec certains systèmes, on peut se procurer des micro-processeurs de navigation. Des mini-ordinateurs et des calculatrices ont été reliés à des unités mobiles afin d'obtenir des données de navigation et de positionnement en temps réel. Les enregistreurs analogues à bande sont utiles pour la surveillance des chevauchements de chenaux.

Observations

Le champ d'induction local s'étend sur 5 km au-dessus de l'eau de mer et sur 10 km au-dessus des eaux douces. Il faut éviter, dans la mesure du possible, de donner au signal un parcours terrestre. Les erreurs peuvent être particulièrement importantes sous des falaises ou des montagnes. Toutefois, on a obtenu des mesures uniformes en mode hyperbolique ou distance-distance au-dessus de la toundra plane et marécageuse à des distances atteignant 100 km. Les systèmes MF sont, plus que tout autre groupe, exposés à l'interférence atmosphérique. Les perturbations atmosphériques causées par la foudre ou les précipitations provoquent souvent des pertes de verrouillage.

Un hélicoptère peut facilement être utilisé en association avec le récepteur d'un système hyperbolique, et peut même être très utile à un navire pour la mesure des constantes d'étalonnage de base et pour l'identification des chenaux. L'antenne devrait être installée verticalement sur l'hélicoptère. Lorsque l'on emploie ce système en hyperbolique ou rho-rho, il est préférable d'apporter, à un point déterminé de la côte, un récepteur de contrôle à enregistrement automatique afin de relever le décalage et d'améliorer ainsi la précision. Ce récepteur devrait être placé aussi près que possible du secteur des opérations.

On a constaté que la portée était considérablement réduite dans le cas des parcours au-dessus de l'eau douce. Les parcours de propagation non homogènes au-dessus des eaux estuariennes saumâtre introduisent des erreurs considérables au niveau des décalages de phases estimés et des vitesses réelles de propagation. La glace de mer influe aussi considérablement sur la vitesse de propagation; aussi le système perd-il énormément de sa précision lorsqu'il est utilisé au-dessus de la glace en dérive ou d'épaisseur variable. Lors d'un levé effectué au nord de l'île Ellesmere, une banquise très épaisse a provoqué la perte totale du signal.

Coût

Environ 300 000 $ pour un système seul, ce qui englobe les sources d'alimentation et les antennes, etc. Des contrats de location peuvent généralement être passés avec des sociétés de topographie.

Usage au Canada

Argo:	Largement utilisé par l'industrie et par le gouvernement.
Hi-Fix:	Utilisé par les organismes du gouvernement responsables de levés.
Mini-fix:	Encore utilisé à l'occasion.
Raydist:	Parfois utilisé par l'industrie.
Toran:	Parfois utilisé par l'industrie.

Fréquences: 90 à 130 kHz

Caractéristiques

De tous les systèmes de positionnement radio à base côtière actuellement utilisés pour les levés hydrographiques, le Decca et le Loran-C sont ceux dont la portée est la plus grande. L'exactitude de leurs mesures repose sur l'utilisation de l'onde de sol. Au-delà de 650 km, les ondes de sol du système Decca à onde continue subissent les interférences causées par l'onde ionosphérique, particulièrement de nuit. En revanche, cette interférence n'affecte pas le Loran-C qui est un système à impulsions. Les chaînes portatives Loran-C ont, pour la plupart, la même portée que le Decca, la puissance des transmetteurs que la chaîne principale utilise donne au Loran-C l'avantage de pouvoir émettre, de jour et de nuit, des signaux très nets jusqu'à 2 000 km. Ce système est légèrement moins précis que le Decca du fait que les transmissions par impulsions véhiculent moins de renseignements sur lesquels on puisse baser les mesures; de plus, l'emploi de la chaîne principale Loran-C fait généralement intervenir un long parcours sur terre. Autres différences, le Loran-C ne peut fonctionner qu'en mode hyperbolique ou rho-rho, tandis que le Decca peut également s'associer au mode distance-distance plus précis.

Portée

La portée est de 650 km (350 milles marins) pour la chaîne principale Decca, Decca portatif (Lambda), Loran-C portatif (Accufix, Pulse/8) et de 2000 km (1000 milles marins) pour la chaîne principale Loran-C. Quel que soit le système, la distance parcourue en milieu terrestre équivaut environ aux 2/3 de la distance parcourue en milieu marin.

Exactitude des mesures (au niveau 2 σ)

Dans de bonnes conditions, la fidélité du Decca est de $\pm$ 25 m et celle du Loran-C de $\pm$ 50 m. Si les systèmes sont bien étalonnés, l'exactitude des distances est de deux à quatre fois supérieure à la fidélité selon la distance et les corrections apportées aux décalages de phase. Comme la vitesse de propagation sur terre ne peut être prévue avec justesse, les trajectoires terrestres ont pour effet d'affaiblir la précision.

Ambiguïté périodique

Ce problème se manifeste lorsque le système fonctionne près des limites de sa portée. En outre, les glissements de chenal sont beaucoup plus fréquent avec le Decca, surtout la nuit. Le système de navigation par satellite Doppler constitue un excellent moyen de résoudre les problèmes que posent l'ambiguïté périodique ou les glissements de chenal.

Station côtière

Les générateurs électroniques et diésels, nécessaires à l'alimentation du système en électricité, pèsent environ 300 kg pour chaque station. Le pylône devrait avoir au moins 45 m de hauteur; sa mise en station nécessite quatre ou cinq hommes et des conditions météorologiques favorables. La prise de terre multiple se compose d'environ 100 fils de cuivre d'une longueur égale à celle du pylône et qui rayonnent de ce dernier. La station côtière doit être assistée par un technicien; aussi, faut-il prévoir une habitation pour le personnel et des abris protecteurs pour les appareils électroniques et les générateurs diésels. Une station peut être érigée en deux jours si l'emplacement est bien dégagé.

L'emplacement doit être choisi avec soin en fonction des critères suivants: obtenir un bon diagramme géométrique de la région en cause, éviter au signal les parcours terrestres, trouver un emplacement dégagé et de niveau qui ne comporte aucun obstacle immédiat et qui, de préférence, repose sur un sol propice à une mise à la terre efficace.

Avantages et inconvénients

Comme les stations émettrices exigent l'intervention de l'homme, elles nécessitent la mise en place d'une vaste infrastructure. Avant sa mise en service, la chaîne doit être étalonnée très minutieusement.

Observations

Si on veut atteindre une précision élevée, il importe d'éviter au signal des parcours sur terre et de prendre en considération les effets du déphasage. Si le système fonctionne en mode hyperbolique ou rho-rho, il faut apporter à un point déterminé de la côte un récepteur de contrôle à enregistrement automatique qui prend note de la stabilité du diagramme et qui apporte les corrections en cas de décalages importants.

La glace de mer formée en une plaque continue provoque des variations dans la vitesse de propagation. L'importance de ces variations dépend de l'homogénéité et de l'épaisseur de la glace. Bien que l'on n'ait pas mesuré les effets de la glace de mer fracturée, il semble qu'ils sont plus faibles du fait que la glace est alors saturée en sel.

En mode rho-rho, il faut vérifier les décalages de temps au récepteur attribuables à la légère différence de fréquence entre les horloges atomiques; le système de navigation par satellite Doppler comporte une technique de vérification hautement recommandée (voir Identification des chenaux (périodes)). Certaines publications donnent les coordonnées des stations des principales chaînes Loran-C d'après le zéro des cartes du système géodésique international (WGS-72). On doit, par conséquent, utiliser les valeurs publiées du zéro des cartes de l'Amérique du Nord 1927 (dans les Aides radio à la navigation maritime ou disponible directement au SHC) lorsque les emplacements précis d'après le zéro des cartes de l'Amérique du Nord de 1927 sont exigés.

En exploitant le Loran-C en mode rho-rho, il est parfois possible de mesurer trois distances ou plus à partir d'un même point. L'intersection des distances additionnelles ainsi obtenues constitue une excellente façon d'évaluer la justesse des mesures et d'identifier les erreurs.

Coût

Chaîne portative: de l'ordre de 250 000 $;
Pylônes et générateurs: environ 50 000 $;
Récepteur de satellite Doppler: environ 50 000 $;

Récepteur rho-rho: 50 000 $ (y compris l'étalon de fréquences);
Certains systèmes peuvent être loués.

Usage au Canada

L'industrie et le gouvernement font largement usage du système Decca; quand au Loran-C utilisé en mode rho-rho, il est utilisé par le Service hydrographique du Canada et l'industrie.

Systèmes Très Basses fréquences (TBF)

Fréquences: 10 à 30 kHz

Caractéristiques

Le système OMEGA et les systèmes de télécommunications TBF ne sont pas suffisamment précis pour donner lieu à diverses applications dans les travaux de levés. Les émissions à très basses fréquences peuvent être captées par des sous-marins à proximité de la surface de l'eau.

Au cours des vingt dernières années, des expériences ont été réalisées en mer, d'abord au moyen de transmissions navales puissantes à très basses fréquences et, plus récemment, à l'aide de transmissions de navigation OMEGA. Fort de l'expérience ainsi acquise, on envisage d'assurer une couverture mondiale, d'ici à la fin de 1983, avec huit émetteurs OMEGA.

Les émetteurs OMEGA fonctionnent en temps partagé, ce qui permet à toutes les stations de transmettre leurs signaux sur la principale fréquence de navigation: 10,2 kHz. Pour l'identification des chenaux, on a recours à d'autres fréquences.

Le système OMEGA se veut une aide à la navigation fonctionnant en mode hyperbolique; cependant, comme les transmetteurs qu'il utilise, à l'instar des stations de communications à très basse fréquence, sont commandés par des horloges atomiques, ils peuvent tous être utilisés en mode rho-rho.

Portée

La portée de ce système est d'environ 10 000 km (6000 milles marins) lorsque le transmetteur fonctionne à pleine puissance. Le signal ne peut être utilisé à proximité de l'émetteur.

Exactitude des mesures (au niveau 2 σ)

Après correction des erreurs dues à l'onde ionosphérique, ce système peut déterminer une distance à $\pm$ 1,5 km près sur la ligne de base hyperbolique et à $\pm$ 3 km près en mode rho-rho.

Si le système est associé à un moniteur qui assure les corrections de différences dans un rayon d'environ 500 km par rapport au navire, sa précision est de $\pm$ 500 m sur la ligne de base hyperbolique et de $\pm$ 1000 m en mode rho-rho.

Ambiguïté périodique

L'identification des chenaux peut s'effectuer au moyen d'un récepteur à deux canaux, mais une bonne réception s'impose.

Stations côtières

Des stations OMEGA sont maintenant établies en permanence en Norvège, au Libéria, à Hawaii, dans le Dakota du Nord, à l'île de La Réunion, en Argentine et au Japon.

Une station dans l'Antarctique complètera le système OMEGA en 1983.

Avantages et inconvénients

Les méthodes actuelles, qui prévoient des corrections manuelles aux erreurs dues à l'onde ionosphérique, sont très fastidieuses.

Observations

Pour l'instant, l'Omega n'est pas à considérer comme un système d'arpentage; il possède néanmoins certaines qualités qui lui permettront de faire fonction de dépannage, là où on ne dispose d'aucun autre système. Il est peu probable qu'il soit un jour intégré au système de navigation par satellite Doppler du fait que les signaux qu'il émet ne semblent pas suffisamment stables pour calculer avec exactitude le cap et la vitesse du bâtiment.

Le système Composite Omega pourrait toutefois s'avérer une solution au problème de correction posé par l'onde ionosphérique. Cette technique exploite la différence de phases à deux fréquences distinctes (dispersion), pour réduire le déphasage absolu, et s'apparente de ce fait à la méthode utilisée pour corriger la réfraction ionosphérique dans les transmissions des satellites Doppler. On travaille actuellement à la mise au point de récepteurs différentiels automatiques qui pourraient exploiter cette technique.

Coût

Un récepteur monocanal coûte environ 9 000 $.

Un récepteur différentiel multicanal coûterait environ 20 000 $.

Usage au Canada

À l'étape de l'évaluation par l'industrie et le gouvernement.

Chapitre 8

Le positionnement par satellite et les systèmes inertiels

Système Transit

Également appelé Doppler, le système Transit est constitué de cinq satellites qui ont été placés sur des orbites polaires à une altitude d'environ 1 000 kilomètres au-dessus de la surface terrestre. Au moyen d'un récepteur approprié, on observe le décalage Doppler entre des signaux diffusés par un satellite, puis on calcule la position de l'antenne réceptrice en convertissant les observations Doppler en différences de distances, et ensuite en déterminant les coordonnées de la station d'observation. Les positions des satellites sont déterminées soit au moyen de messages diffusés par le satellite au moment de l'observation, soit à l'aide d'éphémérides précises calculées après la mission et de façon sélective par le U.S. Defense Mapping Agency. Les positions des satellites peuvent être ou bien gardées fixes, ou bien traitées comme des contraintes pondérées dans la détermination par les moindres carrés des coordonnées de la station d'observation. Pour obtenir une description détaillée du système Transit, du récepteur et du matériel auxiliaire, ainsi que des programmes de traitement des données et des diverses applications, on consultera les Defense Mapping Agency 1976, 1979, 1982 et Stansell, 1978.

Il existe deux modes de positionnement d'un point stationnaire dans le système Transit: le positionnement simple, dans lequel les observations s'effectuent uniquement au point considéré et le positionnement multiple, qui consiste à observer simultanément plusieurs stations, dont au moins une est une station avoisinante dont les coordonnées sont déjà établies. Une installation de forage en place est suffisamment stable pour être considérée comme un point stationnaire. La précision dépend du programme de réduction des données que l'on utilise, de la géométrie du dispositif et du nombre de passages de satellites observés, de la stabilité du point d'observation et des éphémérides employés. En mode de positionnement simple, il est possible d'obtenir une précision de 5 à 10 mètres après environ 25 passages au moyen d'éphémérides de radiodiffusion, à condition que la géométrie soit bonne (disposition des satellites allant vers le nord et vers le sud et passant à l'est et à l'ouest du point d'observation). Au Canada, 25 passages peuvent être observés en moins de deux jours. En mode de positionnement multiple, une précision de 1 à 2 mètres est généralement possible avec 25 passages. La précision augmente en proportion du nombre de passages. Le Canada dispose actuellement d'un réseau de base constitué de plusieurs centaines de stations Doppler (Kouba 1978). Dans le cas de ce réseau, on s'est servi du positionnement multiple et on a pu atteindre une précision relative inférieure au mètre. Toutes les stations sont repérées et plusieurs d'entre elles sont situées le long de la côte et, par conséquent, pourraient servir à positionner un point stationnaire en mer en mode multiple (Levés géodésiques du Canada, 1976 à 1982). Il est question de l'utilisation du positionnement des installations de forage par satellite Doppler dans Adams et al (1981).

Bien que le système Transit n'ait pas été conçu pour exécuter des levés, il peut être d'une grande utilité dans les activités géodésiques en mer (Eaton et al 1976). Lorsqu'il est utilisé à cette fin, l'effet Doppler produit par le déplacement du point d'observation se conjugue à l'effet Doppler du satellite en mouvement. Dans le calcul de la position désirée, il faut soustraire du décalage combiné la composante attribuable au déplacement du véhicule. Ainsi, lorsque les levés s'effectuent en route, les observations Doppler doivent être combinées à d'autres mesures ou à d'autres systèmes, comme le loch du navire et le gyroscope ou le système Loran-C, qui renseignent sur la vitesse et le cap du navire. De très bons systèmes intégrés qui utilisent le Transit ont été mis au point au Canada (par exemple, Wells & Grant 1981, Falkenberg 1981, Swift & Fagan 1981, Delorme 1981).

Le positionnement par Transit produit des coordonnées des stations d'observation qui, en principe, sont géocentriques. Cette géocentricité s'obtient actuellement avec une précision de l'ordre de 5 mètres, ce qui satisfait à la plupart des exigences du positionnement marin. En deçà de cette marge de précision, la géocentricité est conditionnée par le type d'éphémérides utilisées. Plusieurs autres facteurs entrent en ligne de compte (voir Jenkins & Leroy 1979, Lachapelle & Kouba 1980, Seppelin 1974).

Les coordonnées géocentriques cartésiennes obtenues au moyen du système Transit peuvent être facilement converties en coordonnées géodésiques sur un ellipsoïde donné, pourvu que la relation entre le système géocentrique et la surface de référence géodésique soit connue (voir le chapitre sur les systèmes de références géodésiques). Les hauteurs calculées au-dessus de l'ellipsoïde peuvent être converties en hauteurs au-dessus du niveau moyen des mers, c'est-à-dire au-dessus du géoïde, à l'aide des modèles géoïdaux dont on dispose actuellement et qui ont une précision d'environ 1 à 2 mètres au Canada et sur le plateau continental canadien (Lachappelle et Rapp 1982).

Système NAVSTAR/GPS

Le système NAVSTAR (acronyme de NAVigation Satellite Timing And Ranging), également connu sous le nom de réseau global de positionnement (Global Positioning System ou GPS), est un système de radionavigation par satellite qui a été mis au point par le Département de la défense des États-Unis. Le GPS doit être entièrement opérationnel d'ici à 1988. Il servira surtout de système de navigation militaire pour des véhicules terrestres, maritimes et aériens. On ne sait pas au juste dans quelle mesure les civils pourront y avoir accès, mais on sait par contre que, d'ici le milieu des années 1990, le GPS est censé remplacer bon nombre des systèmes de navigation militaires et civils actuellement en usage au sein du gouvernement américain (USDOD/DOT, 1980). Pour obtenir une description du GPS, on consultera l'Institute of Navigation 1980, le Defense Mapping Agency 1982 et l'Association canadienne des sciences géodésiques 1982.

Le GPS sera donc essentiellement un système de navigation, mais il pourra aussi servir à positionner des points fixes avec précision. Lorsqu'il sera entièrement opérationnel, il pourra, au moyen de pseudo-distances (mode "pseudo-ranging"), déterminer des positions tridimensionnelles en continu, en

temps réel, par positionnement simple, à l'arrêt et en mouvement, à 16 mètres près (erreur sphérique probable, c'est-à-dire au niveau de confiance de 50 %). On prévoit que le positionnement multiple ou le positionnement relatif à l'arrêt aura une précision beaucoup plus élevée, c'est-à-dire qu'il pourra déterminer une position à quelques centimètres près sur des distances de 100 kilomètres, selon le type de mesures (Association internationale de géodésie 1979, Defence Mapping Agency 1982).

Les positions obtenues par GPS seront géocentriques et compatibles avec les positions calculées au moyen du Transit. Actuellement, seulement 4 prototypes de satellites GPS fonctionnent en permanence avec une précision très proche de celle que devraient avoir les modèles de production; ces prototypes ont tout de même permis jusqu'ici de réaliser au Canada plusieurs heures de positionnement en mouvement non assisté (Wells et Lachapelle 1981). Divers types d'appareils récepteurs destinés au positionnement simple et au positionnement relatif sont actuellement prêts à servir ou font l'objet de mises au point (Defence Mapping Agency 1982). Les résultats du positionnement simple à l'arrêt obtenus au Canada (Lachapelle et Beck 1982) confirment les estimations de précision rapportées ci-dessus. Jusqu'ici, les résultats du positionnement simple en mouvement au large des côtes (Wells et al 1982) sont encourageants et montrent clairement que le GPS pourrait, une fois achevé en 1988, se tailler une place importante parmi les systèmes de positionnement utilisés en mer, pourvu qu'il soit mis à la disposition des civils.

En outre, le positionnement relatif entre une station côtière fixe et une ou plusieurs stations mobiles en mer améliorera les précisions indiquées ci-dessus. On croit que cette méthode permettra aux civils d'exploiter toutes les possibilités du GPS, ce qui pourrait être le cas après 1988.

Systèmes de positionnement inertiels

Le positionnement inertiel utilise des accéléromètres associés à des gyroscopes directionnels. Un ordinateur en ligne calcule les déplacements le long de trois axes perpendiculaires entre eux, par double intégration de l'accélération.

Le système de mesure est fondamentalement différent des techniques de levé classiques, car il calcule les différences de latitude, de longitude et de hauteur entre des points, ainsi que certains paramètres du champ de la pesanteur de la Terre. Il exécute les mesures très rapidement, quelles que soient les conditions météorologiques, et n'a pas besoin de ligne de visée ni de l'heure précise.

A bord d'un hélicoptère ou d'un véhicule à moteur, le système peut calculer, à beaucoup moins qu'un mètre près, la position d'un point intermédiaire d'un cheminement entre des points connus qui sont distancés de 40 à 50 km.

Les systèmes de levé inertiels sont maintenant employés abondamment au Canada dans les levés géodésiques terrestres. La technologie du positionnement par inertie est décrite en détails dans les actes de deux symposiums internationaux qui ont porté sur le sujet (Association canadienne des sciences géodésiques, 1977, 1981). Un des principaux inconvénients des systèmes inertiels actuellement en usage, c'est qu'il faut immobiliser les détecteurs pendant environ 40 secondes toutes les 4 à 6 minutes pour mettre à jour l'étalonnage. C'est la raison pour laquelle on les a peu employés à bord des navires. D'autres techniques de mise à jour sont à l'étude.

L'utilisation de la technologie du positionnement inertiel dans les applications civiles marines ne fait que commencer, et c'est pourquoi l'on ne dispose pas encore de résultats fiables. Cependant, des recherches intensives se font actuellement pour résoudre le problème de la mise à jour en utilisant comme point de comparaison la vitesse mesurée par d'autres techniques à bord du navire. Il ne serait plus nécessaire d'arrêter le dispositif. On attend toujours les résultats de ces études. Néanmoins, plusieurs projets de recherches sont en cours (par ex., Hagglund 1981, Wong & Schwarz 1982); ils devraient produire des données significatives d'ici quelques années. Les systèmes inertiels seront intégrés à d'autres systèmes, comme le Loran-C ou le GPS, afin d'améliorer la précision relative et refermer l'écart entre les positions déterminées par les systèmes auxiliaires.

Chapitre 9

Les autres systèmes et les systèmes intégrés

Autres systèmes

Systèmes astronomiques

Les observations astronomiques de la latitude et de la longitude peuvent s'effectuer à bord d'une plate-forme stable auto-élévatrice; toutefois, leur précision ne serait pas supérieure à environ 30 mètres par rapport au système de référence astronomique. Des observations astronomiques de haute précision ont été faites à titre expérimental à bord d'un navire, mais ce système nécessite une plate-forme stabilisatrice qui coûte très cher. De plus, la précision obtenue n'était pas aussi bonne qu'elle l'aurait été sur une plate-forme auto-élévatrice ou sur une station côtière. Enfin, pour convertir les positions astronomiques en positions NAD27, cette méthode doit être alimentée en données très précises sur la gravité, qui rendent son coût prohibitif et son emploi peu commode.

Systèmes photogrammétriques

Les méthodes de positionnement photogrammétrique par extension du canevas côtier ont été examinées par les participants de l'Atelier de 1970 et jugées inutilisables. Malgré des progrès récents dans l'utilisation de la photographie simultanée à base aérienne fixe, qui rend possible un positionnement précis à proximité de la côte, dans l'utilisation de la photographie LANDSAT pour étudier la possibilité de construire des îles artificielles au large de la côte du Labrador, ainsi que dans l'utilisation expérimentale de matériel aéroporté de positionnement par inertie pour calculer les centres et orientations photographiques à travers des étendues d'eau libre séparant des stations côtières, aucune découverte d'importance n'est venue modifier les conclusions de l'Atelier de 1970.

Systèmes de positionnement acoustique

Les signaux émis par des systèmes radioélectriques à hautes, moyennes et basses fréquences afin de déterminer la position d'un mobile aérien ou maritime ne pénètrent pas dans l'eau (ou dans la terre) à une profondeur considérable. Quant aux ondes émises par les systèmes radio à très basses fréquences, elles se propagent dans l'eau jusqu'à une profondeur de plusieurs mètres mais ni la profondeur de pénétration, ni la précision obtenue ne permet de localiser des objets qui reposent sur le fond marin, comme des instruments, des têtes de puits ou encore des repères géodésiques. Pour le positionnement sous-marin, il a donc fallu mettre au point des techniques acoustiques qui exploitent la capacité de propagation en eaux profondes des ondes acoustiques. Ces systèmes font appel à des balises ou des transpondeurs acoustiques immergés. Les positions établies au moyen de systèmes acoustiques sont donc rapportées aux positions des balises ou des transpondeurs. Une fois qu'on a déterminé les coordonnées géographiques de la balise, du transpondeur ou de la borne-repère, il est possible de convertir les positions relatives en positions vraies. La première étape d'une opération faisant intervenir des transpondeurs ou des balises acoustiques consiste à obtenir les positions des repères de manière que toutes les positions relatives puissent être converties en coordonnées géographiques vraies.

Les balises acoustiques se distinguent des transpondeurs acoustiques par le fait que leur séquence de transmission ne peut être programmé qu'avant la mise en station; les transpondeurs, qui peuvent à la fois recevoir et émettre des signaux, peuvent être interrogés par un système de commande monté à bord du mobile. Le positionnement acoustique peut s'effectuer selon deux modes géométriques: la configuration à courte ligne de base, qui se fait au moyen d'un transpondeur ou d'une balise, et la configuration à longue ligne de base.

La configuration à courte ligne de base exploite une seule balise émetteuse qui repose sur le fond marin, et une batterie d'hydrophones de bord fixes ou orientables. Le lieu directionnel du mobile par rapport à la balise s'obtient en mesurant la différence de temps de parcours des signaux acoustiques au moment de leur arrivée aux hydrophones. Cette configuration est utilisée lorsque l'on veut essentiellement déterminer avec précision la position d'un véhicule qui se trouve au-dessus ou à proximité d'une balise. Ce mode peut être employé, par exemple, dans une opération de forage où le navire de forage doit être positionné au-dessus de la tête du puits et où la balise est montée sur la tête du puits ou à proximité. Le fabricant indique une précision égale à 0,5 % de la profondeur d'eau.

Lorsque la configuration à courte ligne de base est utilisée avec un transpondeur, les positions sont obtenues par mesure de distances et de directions. Ce système emploie, sur le fond marin, un transpondeur acoustique et, à bord du navire, un système contenant un interrogateur (transmetteur) ainsi qu'une batterie d'hydrophones. Ce système permet de déterminer la distance et la direction de chaque hydrophone par rapport au transpondeur.

Les systèmes à longue ligne de base emploient deux ou plusieurs transpondeurs qui forment, sur le fond marin, un réseau de lignes de base; les positions en surface sont mesurées par rapport à ce réseau, au moyen d'une technique de localisation à deux distances. La distance qui sépare le mobile de chaque transpondeur se calcule au moyen d'un interrogateur placé à bord du navire en mesurant le temps de parcours du signal codé renvoyé par chaque transpondeur. Le traitement de ces données permet d'établir la position du mobile par rapport au réseau formé par les transpondeurs. Celui-ci peut comprendre autant de transpondeurs qu'il en faut pour couvrir la région étudiée; toutefois, tous doivent être identifiables.

Beaucoup de sociétés produisent du matériel acoustique pour des levés en mer. Les progrès réalisés dans ce domaine au cours des dernières années ont porté essentiellement sur les périphériques et le logiciel nécessaires à la construction d'un système d'exploitation.

Un système type à deux transpondeurs aurait une portée de 10 kilomètres, les transpondeurs étant séparés par une ligne de base d'environ 5 kilomètres. La précision relative du positionnement serait supérieure à 10 mètres (au niveau 1 σ), et le système coûterait approximativement 40 000 $, y compris les dispositifs nécessaires pour adapter le système au mobile.

En règle générale, le coût d'un système à balises n'atteint pas la moitié de ce chiffre.

Systèmes de navigation sonar-Doppler

Un système sonar-Doppler se compose de quatre transducteurs braqués vers le fond marin et montés sur un navire dans les directions avant, arrière, gauche et droite. Ces transducteurs transmettent et reçoivent des signaux sonores dont la fréquence se situe entre 300 et 600 kHz et mesurent le décalage Doppler du signal réfléchi par le fond marin.

Le décalage entre la fréquence reçue et la fréquence émise est proportionnel à la vitesse de propagation du signal entre l'émetteur-récepteur et la surface réfléchissante. Il est alors possible de déterminer les vitesses de propagation avant-arrière et gauche-droite. Si, en plus, le système est couplé à un compas gyrostatique, ces vitesses peuvent déterminer le cap et la vitesse vrais du navire. La batterie de transmetteurs est montée dans le puits du navire, chaque transducteur faisant précisément un angle de 30° par rapport à la verticale. L'ensemble de ce dispositif est un système de navigation sonar-Doppler.

Au début de l'opération, le système doit être rattaché à une position connue, et un ordinateur branché sur ce système peut faire apparaître sur un écran de visualisation les coordonnées (X,Y) du point initial. Les systèmes sonar-Doppler sont pour la plupart utilisés en association avec le système de navigation par satellite Doppler. Le système sonar-Doppler calcule des vitesses précises en vue du positionnement par satellite et fournit continuellement des informations entre les déterminations de position. Le système de navigation par satellite Doppler, de son côté, peut fournir les positions initiales et exécuter des vérifications périodiques.

Jusqu'à récemment, le système sonar-Doppler n'était vraiment utile qu'à des profondeurs inférieures à 200 mètres. Au-delà de ces profondeurs, les échos provenant du fond de la mer ne pouvaient être reçus clairement, du fait qu'il était difficile de déterminer si les signaux reçus étaient réfléchis par le fond marin ou par des discontinuités entre les couches de la masse d'eau. A moins que le système ne soit utilisé de façon strictement conforme aux spécifications et que des vérifications ne soient faites périodiquement en des points de référence connus, le risque que les vitesses et positions calculées soient entachées d'erreurs importantes est toujours présent. Un mouvement soudain du navire dû au mauvais temps ou à des manoeuvres brusques peut entraîner une perte de précision.

Plusieurs fabricants redessinent le matériel sonar-Doppler de manière qu'il puisse capter des signaux réfléchis à des profondeurs supérieures à 500 mètres.

Précision du système

- Position du navire en temps réel
  Pour peu que le sonar-Doppler puisse maintenir un contact continu avec le fond marin et qu'il soit convenablement couplé à un compas gyrostatique et à un récepteur de signaux Doppler, le système peut atteindre, dans la zone étudiée, une fidélité d'environ 300 mètres au niveau 1 σ.

- Analyse postérieure à la mission
  Par redressement des données en temps réel à la fin de la mission, on obtient une précision globale (par rapport au NAD27) d'environ 300 mètres au niveau 1 σ.

Coût du système

Logement et installation de la batterie de transducteurs	30 000 $
Matériel sonar-Doppler	80 000 $
Compas gyrostatique	10 000 $
Total	120 000 $

Systèmes intégrés

L'intégration des systèmes ne se limite pas à l'informatisation des données produites par un système de positionnement. Elle consiste plutôt à combiner deux ou plusieurs systèmes de positionnement de manière à ce que les points forts des uns compensent les faiblesses des autres. Les résultats obtenus sont parfois très efficaces.

Il est possible, par exemple, d'associer des récepteurs de signaux de satellite Doppler au système rho-rho Loran-C. Le système de navigation par satellite Doppler est relativement libre d'erreurs systématiques mais, en revanche, il est entaché d'erreurs accidentelles assez importantes qui dépendent du degré de précision de la mesure du cap et de la vitesse du navire; il a donc une mauvaise fidélité. Il effectue des déterminations de position à des intervalles qui varient de une à deux heures suivant la latitude, et ne peut donc être utilisé pour un positionnement continu en route. Le système rho-rho Loran-C, pour sa part, exige beaucoup de synchronisation; il est donc exposé à des erreurs systématiques causées par des anomalies dans la vitesse de propagation des ondes et par la dérive de l'oscillateur due aux écarts entre les horloges atomiques (repères de fréquence) du transmetteur et du récepteur. Cependant, sur une période d'une journée et sur une distance de plusieurs centaines de kilomètres, sa fidélité est excellente. Une fois intégrés, les deux systèmes assurent un positionnement continu avec une bonne fidélité à long terme, puisque le Loran-C produit des données précises sur la direction et la vitesse du mobile au moment d'un passage du satellite Doppler. La position déterminée avec précision par le satellite est utilisée pour calculer des distances théoriques Loran-C et les comparer aux distances observées de façon à déterminer la dérive de l'oscillateur et le facteur secondaire additionnel (Grant, 1976).

On peut également ajouter à ce système intégré le loch et le gyroscope du navire. Ces deux instruments ont des erreurs systématiques importantes. Le loch mesure la vitesse du navire par rapport à l'eau, mais non la vitesse par rapport au fond marin, tandis que le gyroscope mesure l'angle que fait le Nord avec le cap du navire et non pas avec la route moyenne vraie. Néanmoins, ces deux appareils réunis donnent à court terme une indication plus exacte du déplacement du navire, tandis que le Loran-C corrige à long terme les erreurs systématiques du loch et du gyroscope.

Hittel et Kouba (1971) ont fait état d'un autre système intégré, qui combine le système de positionnement par satellite Doppler et le Decca 12f. Les raisons pour lesquelles ces deux systèmes sont utilisés simultanément sont en grande partie les mêmes que dans le cas de l'intégration du satellite Doppler et du Loran-C. Il est possible de combiner le satellite Doppler à presque n'importe quel système de radiolocalisation. Jusqu'à maintenant, le Loran-C, le Pulse/8, l'Accufix, le Decca 12f, le rho-rho Decca, le Hifix et l'Argo ont été utilisés.

On a également associé le positionnement par satellite Doppler ou le Loran-C à l'Argo. Le Loran-C ne pouvant attein-

dre la précision exigée, il a fallu recourir à l'Argo. Le Loran-C a néanmoins été intégré au système étant donné que l'Argo avait tendance à perdre des couloirs la nuit. Les opérations devaient se dérouler nuit et jour et il fallait éliminer les pertes de temps entraînées par la correction des mesures Argo (Falkenberg, 1981).

Si la profondeur de la zone à lever permet au sonar-Doppler de garder le contact avec le fond marin (c'est ce que l'on appelle la poursuite du fond marin), un système de positionnement par satellite Doppler couplé à un loch sonar-Doppler et à un gyroscope peut assurer un bon positionnement. Le Service hydrographique du Canada a déjà utilisé ce système dans la baie d'Hudson.

Le Service hydrographique du Canada a confié à l'entreprise une étude qui avait pour but de déterminer s'il serait possible d'utiliser les nouveaux satellites GPS en association avec le positionnement par satellite Doppler et le système Loran-C dans la région de la baie Baffin. Dans ce secteur, on ne dispose que d'une seule distance Loran-C, bien qu'il en existe une autre sur l'onde de ciel, et entre un et quatre satellites GPS sont présents jusqu'à 14 heures par jour. A l'aide d'une seule pseudo-distance GPS et une distance Loran-C, il est possible de calculer la position, mais la constante de synchronisation GPS et la marche de l'horloge restent inconnues. Sachant que les satellites GPS ont des fréquences atomiques stables, il serait possible de déterminer la constante de synchronisation et la marche de l'horloge du Loran-C et des satellites GPS par rapport au repère de fréquence atomique utilisé à bord du navire, en comparant les distances mesurées aux distances calculées d'après la position du satellite Doppler sur une période de plusieurs jours. Avec deux pseudo-distances GPS et une seule distance Loran-C, on peut déterminer la position et la constante de synchronisation GPS et établir la marche de l'horloge par rapport à la position du satellite Doppler. Avec trois ou quatre satellites GPS et une seule distance Loran-C, on obtient, à chaque reprise, tous les éléments de l'équation.

En général, la précision du positionnement augmente proportionnellement au nombre de satellites GPS qui se trouvent au-dessus de l'horizon. Cependant, la disposition des satellites les uns par rapport aux autres se modifie constamment et il y a des périodes où la solution est faible parce que les satellites sont mal placés par rapport à la position du navire (Wells, Delikaraoglou et Nanicek, 1982). Les travaux sur le terrain exploitant les techniques mises au point dans le cadre du contrat font actuellement l'objet d'une étude.

Les données produites par les systèmes intégrés doivent être traitées par ordinateur, généralement en temps réel, mais parfois aussi en post-traitement. Les ordinateurs peuvent exécuter les algorithmes complexes des calculs géodésiques, faire des ajustements par les moindres carrés ou encore calculer le filtrage Kalman et le décalage de phases, y compris la méthode de Millington qui sert à estimer le facteur secondaire additionnel. Jusqu'à maintenant, la plupart des utilisateurs de systèmes intégrés ont conçu et construit leur propre logiciel d'ordinateur et, dans certains cas, une certaine partie du matériel. L'industrie ne fait que commencer à fabriquer ou à fournir des systèmes intégrés, et il est à prévoir qu'au cours des prochaines années, elle sera beaucoup plus active dans ce domaine.

Chapitre 10

Les levés hydrographiques

Dans ce chapitre, nous expliquerons les principes de fonctionnement du matériel et des techniques utilisés en mer, à l'intention des arpenteurs qui en sont à leurs premières armes dans le milieu marin. Nous attirerons l'attention du lecteur sur quelques-unes des questions à considérer dans la planification et l'exécution d'un levé hydrographique.

Les levés hydrographiques ont pour but de mesurer la profondeur d'eau et de déterminer les positions des objets immergés. Sur la terre ferme, un arpenteur peut voir l'objet à positionner et utiliser des méthodes directes telles que la triangulation, la trilatération et le cheminement. L'hydrographe, par contre, ne voit pas le fond de la mer; même la terre ferme est hors de sa vue, et c'est pourquoi il doit recourir à des méthodes indirectes pour déterminer des positions et des profondeurs.

Planification

L'exploitation d'un navire hydrographique coûte cher, et c'est pourquoi tout levé hydrographique doit être précédé d'une bonne planification, afin d'éviter les coûts prohibitifs et les échecs. La personne à qui incombe la gestion d'un levé marin doit s'y connaître en logistique et, lorsqu'il en a le temps, il doit étudier les conditions météorologiques qui règnent dans la région des opérations projetées. Les vents forts diminuent la précision des levés altimétriques et planimétriques; ils rendent difficile la mise à l'eau ou la remontée des vedettes et, parfois, obligent le capitaine du navire à chercher un abri. La pluie et le brouillard affectent les systèmes de positionnement électronique, en particulier les dispositifs à faible puissance et de courte portée. Les orages électriques nuisent eux aussi aux systèmes de positionnement; dans les observations à longue distance, certains orages électriques ne sont même pas observables du navire. Les tempêtes sont prévisibles selon la saison et la région, mais on ne peut en prévoir la durée ou l'intensité avec précision. Ces phénomènes interrompent les communications radio à certaines fréquences et réduisent la portée ou rendent intermittente la communication des systèmes de positionnement à onde de sol. Le lever et le coucher du soleil affectent certains systèmes de positionnement de la même manière que les tempêtes solaires, mais pendant de brèves périodes. Une étude des statistiques donne souvent une bonne indication de l'époque de l'année qui se prête le mieux à un levé.

Le choix du matériel fait aussi partie intégrante de la planification. On trouve aujourd'hui sur le marché un large éventail d'échosondeurs et de systèmes de positionnement. Nous avons déjà parlé des systèmes de positionnement dans un chapitre antérieur; nous verrons les caractéristiques des échosondeurs plus loin dans ce chapitre.

Il est également à conseiller de faire une étude approfondie du canevas côtier, dès que possible avant l'exécution du levé.

Les points de contrôle établis le long de la côte et la nature du littoral ont également une grande importance pour l'hydrographe. Le Tableau 1 du chapitre 4 donne un aperçu des canevas existants et de leur ordre de précision dans les divers secteurs du littoral canadien.

Les stations géodésiques sont généralement situées à l'intérieur des terres et, souvent, au sommet de collines. Or, l'hydrographe a besoin de points géodésiques sur la laisse de haute mer ou à proximité. Aussi, est-il souvent obligé d'établir son propre canevas en le rattachant à des positions géodésiques adéquates. Les stations devraient être établies à l'intérieur des limites d'un canevas de troisième ordre, conformément aux *Spécifications pour levés de contrôle et conseils concernant la construction des repères* (1978) publiées par la Direction des levés et de la cartographie, ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, à Ottawa, et à la publication spéciale n° 44 du Bureau hydrographique international (BHI). Une précision supérieure au troisième ordre est hautement souhaitable pour le positionnement des stations côtières des systèmes électroniques utilisés pour des levés marins.

De plus, des positions peuvent être communiquées aux entreprises par le Service hydrographique du Canada (SHC) ou d'autres organismes. La Base nationale de données géodésiques établie par la Division des levés géodésiques du Canada et décrite dans le chapitre 4, donne des informations sur les canevas existant au Canada, et tout entrepreneur qui procède à des levés en mer aurait intérêt à communiquer avec la Division des levés géodésiques du Canada, à Ottawa, ou avec un des Bureaux régionaux du SHC, au ministère des Pêches et des Océans, pour obtenir les plus récentes listes des coordonnées d'une région en particulier. Le géomètre peut aussi se procurer des données supplémentaires, comme des altitudes, des surfaces de référence et des rattachements à d'autres réseaux.

Choix de l'emplacement des stations côtières d'un système de positionnement électronique

Les facteurs suivants doivent être pris en considération lors de l'établissement de la chaîne hyperbolique d'un système de positionnement en mer.

a) Il faut disposer les stations de façon à ce que le réseau de points ait une bonne configuration dans la région à lever.
b) Les lignes de base devraient avoir la même longueur.
c) L'angle entre les lignes de base devrait se situer entre 90° et 120°.
d) Les étendues de terrain entre les stations et la région à lever doivent être réduites le plus possible.
e) Il faut éviter dans la mesure du possible que les lignes de base joignant des stations principales à des stations asservies passent sur la terre ferme.
f) Les emplacements doivent être déblayées et de niveau, afin de faciliter l'installation de la base de l'antenne.
g) Le sol du terrain doit avoir une bonne conductivité. Un sol humide est préférable; un terrain rocailleux est mauvais, un terrain sablonneux encore pire. Il faut éviter les terrains où la conductivité est variable.
h) Le site ne doit pas renfermer:
   i) des lignes d'électricité ou de téléphone dans un rayon de 100 m de la station;
   ii) des arbres ou d'autres obstacles de hauteur comparable à celle des antennes qui se trouvent sur la trajectoire des signaux;

iii) des falaises ou des arbres derrière les antennes, qui pourraient réfléchir les signaux;

iv) des radioémetteurs qui utilisent une longueur d'onde voisine de la fréquence ou de la demi-fréquence du système.

i) Le site doit être surélevé, surtout dans le cas des systèmes à longue distance; mais il est encore plus important qu'il soit situé à proximité du bord de l'eau.

j) Il faut choisir les sites de manière à rendre possibles des croisements de lignes de base afin de faciliter l'étalonnage.

k) Le site doit être facile d'accès (par hélicoptère, camion ou vedette).

l) Si le site se trouve sur un terrain privé, il faut obtenir du propriétaire l'autorisation d'ériger une station.

Il n'est évidemment pas possible de réunir toutes ces conditions en même temps; l'hydrographe doit faire un choix et reconnaître les limites et les contraintes que lui imposent ses décisions. Une fois que le site a été choisi et levé, il doit être marqué d'une borne permanente, rapporté à un réseau et décrit.

Un même point du canevas peut toujours servir à positionner un puits d'exploration ou de production; il peut être alors avantageux de consulter l'Appendice E lorsqu'il s'agit d'un levé de puits d'exploration, ou le *Manuel d'instructions pour l'arpentage des terres du Canada* (ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 1979) lorsqu'il s'agit d'un levé de puits de production.

L'échosondeur

Il faut bien comprendre qu'un échosondeur mesure non pas la profondeur, mais le temps de parcours aller-retour d'une impulsion sonore entre l'émetteur et le fond marin. On convertit ensuite cet intervalle de temps en profondeur, en le multipliant par la vitesse de propagation du son dans l'eau, ce qui donne:

$$\text{profondeur} = \tfrac{1}{2}\, t \cdot v$$

où t = temps de parcours aller-retour de l'impulsion entre l'émetteur et le fond marin

v = vitesse de propagation du son dans l'eau

L'écho

L'échosondeur émet une impulsion sous la forme d'une onde sonore ou d'une onde de compression. La fréquence, la durée et la forme de cette impulsion peuvent varier selon le type de transducteur utilisé; elle peut se propager également dans toutes les directions à partir de la source ou être concentrée dans un faisceau.

Les impulsions à basses fréquences, inférieures à 100 kHz, peuvent se propager sur de longues distances et pénétrer profondément dans le fond marin avant d'être réfléchies par des couches sous-jacentes. Cependant, si on veut les concentrer dans un faisceau, il faut employer un transducteur de forte puissance.

Les impulsions dont la fréquence dépasse 100 kHz s'utilisent avec des transducteurs compacts, mais elles ont une puissance qui décroît assez rapidement dans l'eau et ne pénètrent pas profondément dans le fond marin.

L'hydrographe choisit normalement une fréquence aussi élevée que possible à condition que le dispositif ait une portée satisfaisante. Lorsqu'il lui est difficile de faire un compromis, il peut employer des sondeurs qui utilisent deux fréquences, généralement 30 kHz et 100 kHz.

Pour accroître la profondeur de pénétration, il faut parfois augmenter la puissance de l'impulsion, par exemple, en augmentant la durée du signal. Pour les faibles profondeurs, on a généralement recours à une courte impulsion d'environ 1/5 000 de seconde. Les échosondeurs conçus pour les eaux plus profondes produisent généralement une impulsion dont la durée se situe entre 1/1 000 de seconde et 1/25 de seconde, pour compenser la perte due à l'atténuation du signal.

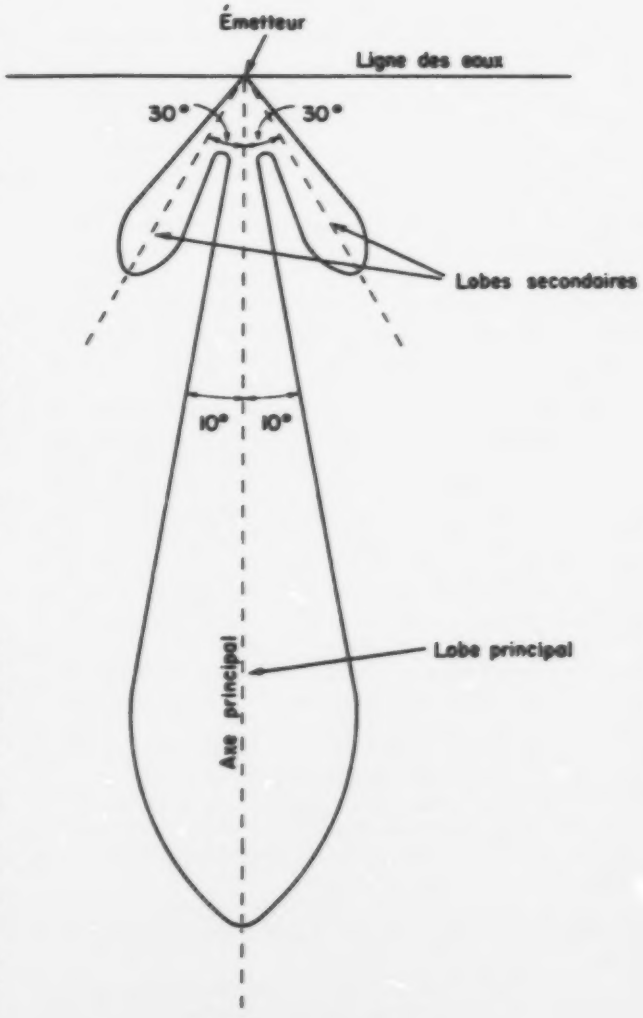


Figure 30
Lobes transducteurs de l'échosondeur

Largeur du faisceau du transducteur

Quand on choisit l'échosondeur à utiliser, il faut accorder une attention toute particulière à la largeur du faisceau du transducteur. Il est inutile de laisser l'impulsion se propager dans toutes les directions. Les transmetteurs sont donc munis de transducteurs qui ont pour fonction de concentrer le faisceau.

En règle générale, le faisceau d'un transducteur a la forme d'un cône dont le sommet fait un angle d'environ 30°. L'énergie est en majeure partie concentrée dans le lobe principal, dont les limites sont généralement définies comme les points 3dB. A mesure que l'on s'éloigne de ces points, la puissance diminue rapidement, mais il se crée d'autres concentrations d'énergie sous forme de lobes secondaires. Ceux-ci sont inutiles et peuvent parfois produire de faux échos (voir la Figure 30).

La plupart des transducteurs couplés à des échosondeurs hydrographiques ont une largeur de faisceau de 20° à 30°, ce qui permet à l'hydrographe de détecter des anomalies de part et d'autre de la route du navire. La Figure 31 illustre l'effet de la largeur du faisceau sur l'espacement des lignes du levé.

Les premiers échos d'une impulsion transmise sont renvoyés au transmetteur par la surface réfléchissante la plus proche, et pas nécessairement par la partie du fond marin qui se trouve sur la verticale du navire. Les échos provenant des pentes sont à l'origine de certaines erreurs sur la profondeur (voir la Figure 32).

Il se produit également d'autres phénomènes, comme l'effet hyperbolique et l'écho secondaire. Il en sera question plus loin.

Le degré d'amplification du signal influe évidemment sur la qualité de l'enregistrement analogique. Si le gain est fixé à une valeur basse, les premiers échos faibles provenant d'un fond marin qui s'avère un mauvais réflecteur ne seront peut être pas détectés. S'il est trop élevé, du bruit peut apparaître sur l'enregistrement et compliquer l'interprétation des données, notamment lorsque l'on utilise un convertisseur numérique de profondeurs.

Détermination de la vitesse du son

Comme nous l'avons vu précédemment, la vitesse de propagation du son dans l'eau est un des deux principaux facteurs qui déterminent la profondeur. Cette vitesse varie en fonction de la température, de la salinité et de la pression de l'eau, et toute augmentation de l'une ou l'autre de ces variables se traduit par un accroissement de la vitesse. L'amplitude maximale pouvant vraisemblablement être atteinte varie de 1 387 m/s dans l'eau douce à 0°C, et 1 529 m/s dans l'eau salée et chaude. En mesurant la température et la salinité dans une colonne d'eau, il est possible de calculer une vitesse moyenne du son dans la colonne d'eau.

On peut employer un vélocimètre pour mesurer la vitesse du son en un point et, après les mesures prises en plusieurs points de la colonne, établir une vitesse moyenne. Il existe maintenant des vélocimètres conçus pour être abandonnés après usage. Ces sondeurs peuvent être placés en dérive et servent à établir un profil de vitesses avec rapidité et commodité. Chaque

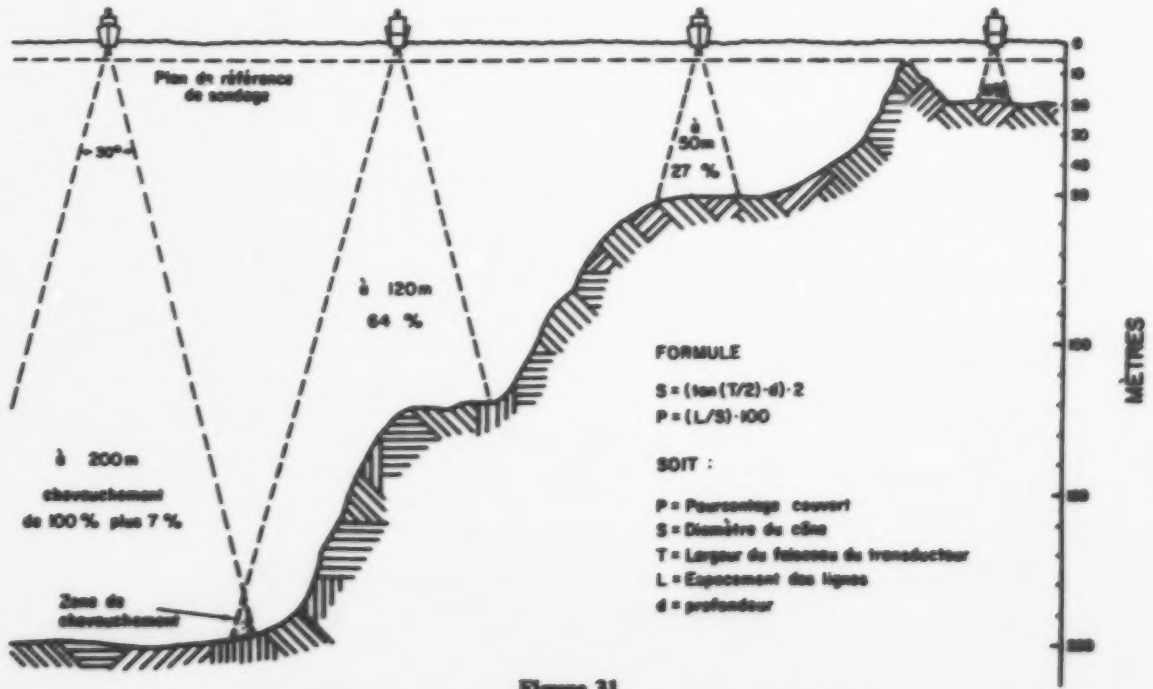


Figure 31
Variation du pourcentage du fond marin couvert en fonction de la profondeur et de la largeur du faisceau du transducteur de 30° et de l'intervalle des lignes de 100 m

sondeur coûte environ 80 dollars (1981), le matériel de bord non inclus.

Il est à conseiller d'établir des profils pour l'ensemble de la région à lever, de déterminer une moyenne à partir des résultats obtenus et d'utiliser ce chiffre dans le traitement des données. Dans les régions où l'on observe des variations extrêmes de la vitesse, il faut évidemment procéder à un échantillonnage plus intensif et plus fréquent.

Lignes de transmission: Les profondeurs sont mesurées entre la surface de la mer et le fond marin mais, étant donné que les transducteurs sont placés sous la ligne de flottaison du navire, il faut tenir compte de l'écart entre la ligne de flottaison et le transducteur. C'est ce qu'on appellera le tirant au transducteur. Chaque fois que le transducteur émet une impulsion, une petite partie de celle-ci est directement enregistrée et produit une petite marque sur la bande. Une succession de marques forme une ligne qui s'appelle "ligne de transmission". Cette ligne de transmission n'apparaît que dans la première phase et doit être réglée de façon à ce que sa valeur mise à l'échelle corresponde à celle du tirant au transducteur, ce qui donne la profondeur vraie. Cette vérification est importante, car il est d'usage sur beaucoup de navires, en particulier ceux qui ne sont pas habituellement affectés à des levés hydrographiques, de régler la ligne de transmission à une valeur située sous la quille du navire et ainsi d'indiquer la profondeur correspondant au seuil de sécurité. Il faut également se rappeler que, sous l'effet de l'accroupissement du navire, le tirant d'eau du navire et, par le fait même, le tirant au transducteur peuvent différer selon que le navire est à l'arrêt ou en route.

Phasage: Étant donné que l'échogramme n'est pas suffisamment large pour représenter d'un seul coup d'oeil et avec précision tout le spectre des profondeurs, on le divise en plusieurs sections successives appelées phases, dont chacune s'étale sur toute la largeur de l'échogramme et sur lesquelles les profondeurs sont graduées avec plus de précision. Le phasage consiste à déplacer la ligne de transmission, soit mécaniquement soit pas voie électronique, de façon à ce que le fond marin se trouve toujours dans l'intervalle de profondeurs qui apparaît sur l'échogramme. Les phases ordinairement utilisées vont de 0 à 80 mètres, de 60 à 140 mètres et de 120 à 200 mètres. Il y a toujours une zone de chevauchement, et l'hydrographe avisé doit toujours observer la variation de la profondeur du fond marin et changer de phase en conséquence, de manière à ce que le fond puisse être "poursuivi" de façon continue. Certains sondeurs produisent un code périodiquement, afin d'indiquer la phase dans laquelle se trouve le sondeur, mais il faut toujours veiller à prendre en note tous les changements de phase observés sur l'échogramme.

Il est aussi important d'assurer un bon repérage entre les diverses phases, de façon, par exemple, à ce que l'isobathe de

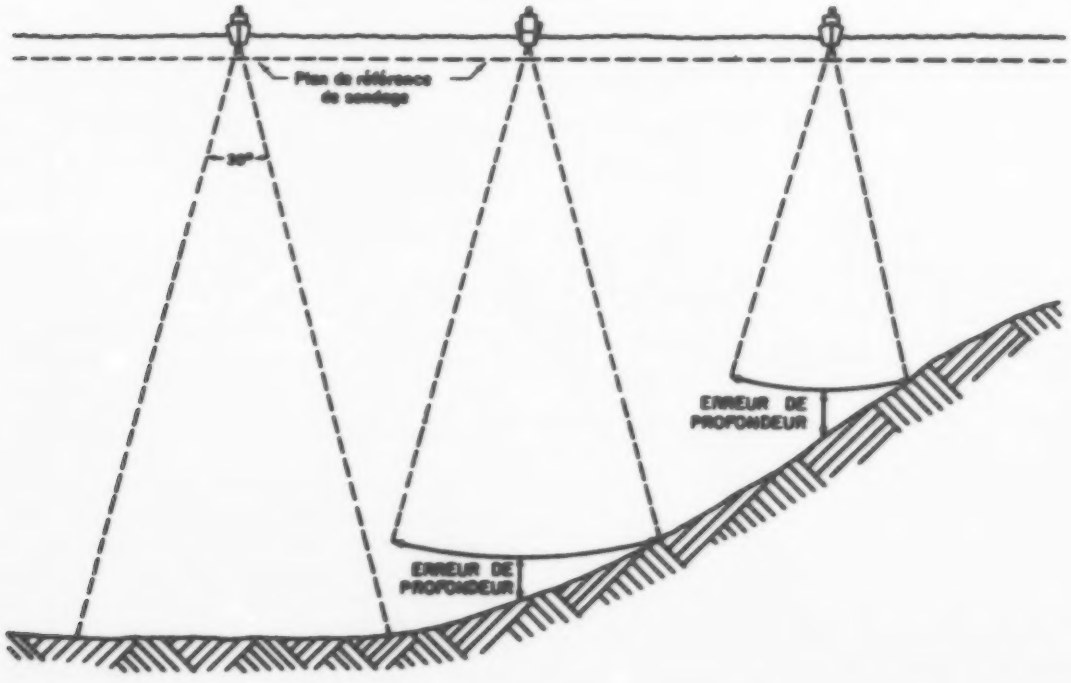


Figure 32
Erreurs de profondeur de la sonde dues à la pente du fond marin

70 mètres soit le même dans les phases 0-80 mètres et 60-140 mètres. Il peut arriver aussi que la profondeur soit indiquée sur l'échelle 120-200 mètres alors qu'en réalité, le commutateur de phase du sondeur a fait plus d'un tour complet et que la profondeur réelle soit beaucoup plus grande que la profondeur indiquée.

Effet hyperbolique et échos secondaires: Dans les eaux profondes, la largeur du faisceau du transducteur produit un effet hyperbolique. Si le navire en position "A" (Figure 33) se trouve directement au-dessus d'un fond marin plat, le bord d'attaque du cône ayant un sommet de 30° commence à détecter le haut-fond "X". Comme la distance oblique au haut-fond est égale à la distance verticale au fond marin, les échos provenant des deux endroits coïncident. A mesure que le navire se rapproche de la verticale à "X", la distance oblique décroît en produisant l'effet hyperbolique illustré dans la figure. De la même façon, lorsque le navire se rapproche de la position "B", le bord de fuite du faisceau atteint le haut-fond "Y". La vallée qui sépare les hauts-fonds est presque masquée sur l'enregistrement et, en temps normal, elle ne serait pas détectée. En trois dimensions, l'enregistrement peut être encore plus confus du fait que des hyperboles sont produites par des objets situés de part et d'autre de la route du navire. La Figure 33 représente un échogramme type qui illustre l'effet hyperbolique.

Dans les eaux moins profondes, les lobes secondaires du faisceau principal peuvent capter des objets situés à une distance inférieure à la distance verticale qui sépare le fond marin et le transducteur. Les échos secondaires ne doivent pas être laissés pour compte, car ils peuvent indiquer la présence d'un détail important mais non détecté sur un des côtés de la route du navire.

Divers signaux parasites: Outre l'effet hyperbolique et les échos secondaires, divers signaux parasites peuvent venir compliquer l'interprétation des échogrammes:

a) Poissons — Un poisson seul est facile à reconnaître, mais un banc de poissons à proximité du fond marin peut masquer des signaux réfléchis par le fond marin.
b) Thermoclines — Une variation brusque de la température dans la colonne d'eau peut faire dévier ou réfléchir l'impulsion.
c) Couche de diffusion profonde — Une couche de plancton qui se trouve à peu près à l'isobathe 500 mètres dans la mer libre en plein jour mais qui monte vers la surface la nuit constitue une bonne surface réfléchissante.
d) Varech ou herbe — Cette végétation ne se rencontre qu'à de faibles profondeurs, en particulier autour des hauts-fonds, et peut complètement embrouiller le fond marin;

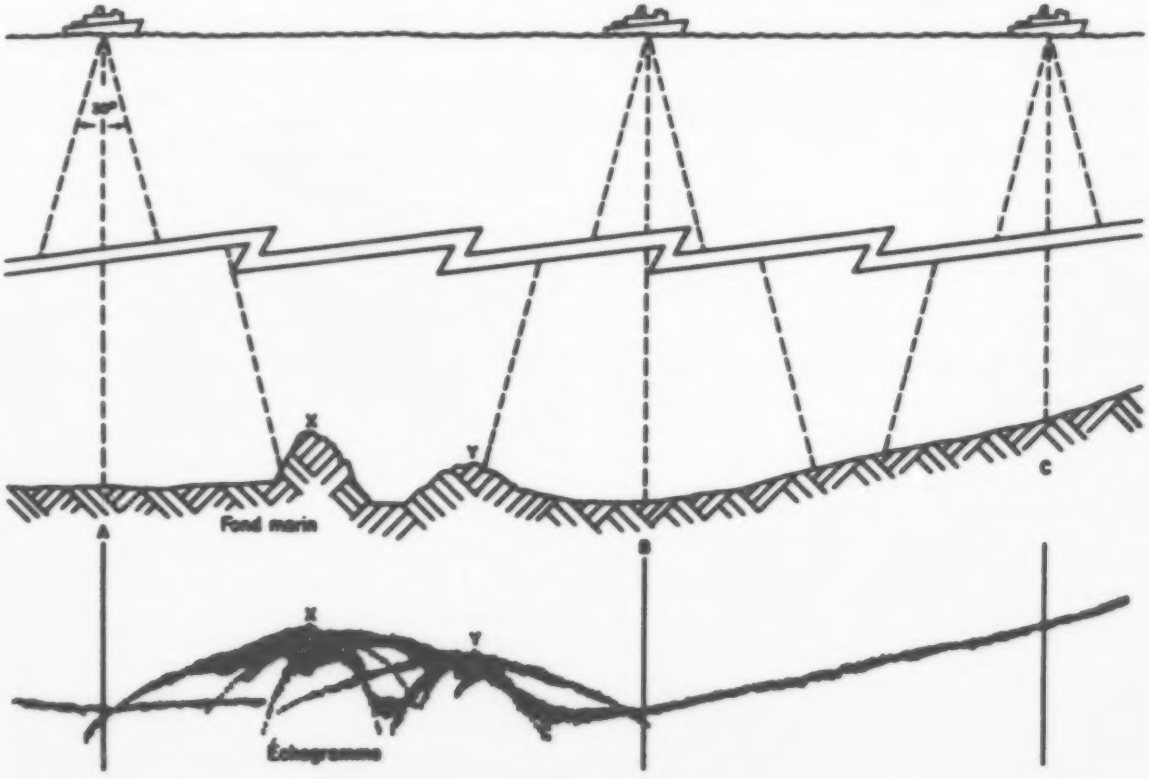


Figure 33
Effet hyperbolique causé par la sonde

l'hydrographe doit alors utiliser une ligne de sonde ou une perche à sonder.

e) Sources d'eau douce — Une remontée d'eau douce peut être prise à tort comme un haut-fond sur l'enregistrement.

Sondages

Le navire hydrographique suit des lignes de sondage préalablement déterminées. Sa direction est maintenue au moyen de la route au compas, ou encore à l'aide d'un indicateur gauche-droite facultatif qui est équipé d'un système de positionnement électronique et qui permet au bâtiment de suivre une hyperbole ou un cercle de distances appartenant à ce système. Certains de ces systèmes rendent également possible l'affichage des coordonnées X et Y; souvent, ils peuvent être couplés à des traceurs de routes. Dans la mesure du possible, les lignes devraient être levées de manière à donner des courbes de niveau nettes. A des intervalles rapprochés, on exécute une détermination de position et on indique le numéro et l'heure du positionnement sur l'échogramme. Si un enregistrement automatique continu de la profondeur et de la position est possible, on a beaucoup moins de notes à inscrire. Le début et la fin de la ligne devraient être indiqués sur le tracé. Lorsque l'enregistrement s'effectue de façon manuelle, d'autres déterminations de position doivent être faites chaque fois que la vitesse ou la direction du navire est modifiée. *On conseille de lever également des lignes à peu près perpendiculaires aux lignes de sonde régulières, en guise de vérification des lignes de sonde principales.* Les ordonnances permanentes du Service hydrographique du Canada stipulent que ces lignes de vérification doivent être séparées d'environ 7,5 centimètres à l'échelle de la feuille de levé dans les profondeurs de 180 mètres ou moins, et de 15 centimètres à la même échelle dans les profondeurs supérieures à 180 mètres.

Traitement des données

Une fois observées sur l'échogramme ou extraites de la bande numérique, les données doivent être corrigées des facteurs suivants:

a) État de la marée. Quand on mesure une profondeur, il faut tenir compte de la hauteur de la marée au moment de la mesure.

b) Étalonnage du sondeur indépendamment de l'erreur sur la vitesse du son.

c) Erreur sur la vitesse du son.

Il est important de tracer les sondes mesurées dès que possible après la journée de travail, de manière à pouvoir lever d'autres lignes au-dessus des hauts fonds, retourner dans les zones où les données sont inacceptables ou combler les vides constatés dans la couverture, avant que le navire ne s'éloigne trop de la région en cause.

Vérification manuelle (étalonnage)

Au début et à la fin de chaque journée de sondage, le sondeur doit être soumis à une vérification manuelle. Cette vérification s'effectue au moyen d'un objet réfléchissant et pesant, une barre par exemple, que l'on fait descendre le long d'une ligne graduée à différentes profondeurs sous le transducteur. Au lieu de la barre traditionnelle, on peut aussi utiliser une assiette renversée et obtenir de bons résultats (voir la Figure 34).

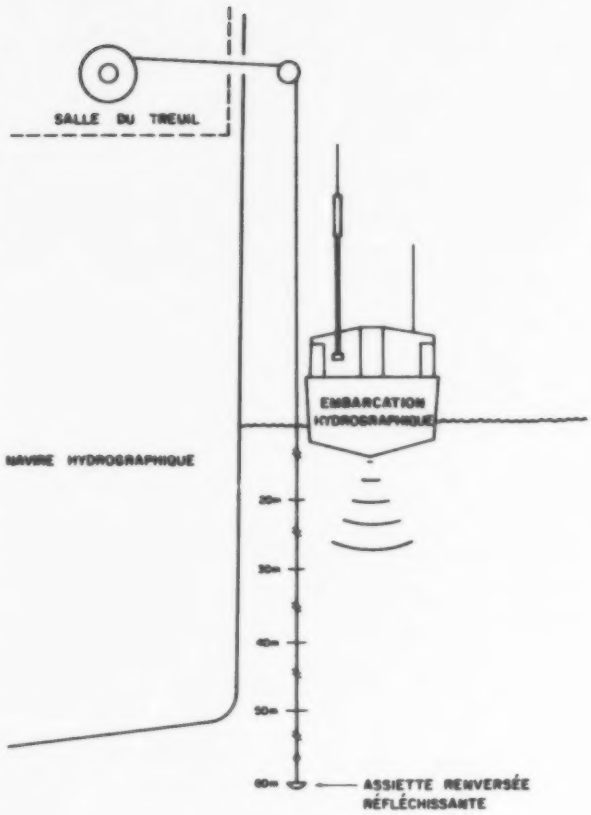


Figure 34
Procédure d'étalonnage du sondeur

La lecture du sondeur est comparée à la profondeur à laquelle l'objet est suspendu. Les vérifications manuelles sont réalisables jusqu'à des profondeurs de 20 mètres mais, dans des conditions favorables, on peut obtenir de bons résultats jusqu'à des profondeurs de 50 mètres (voir la Figure 35). L'écart entre les profondeurs comparées peut être attribuable à la différence entre la présumée vitesse du son et la vitesse moyenne réelle du son mesurée à la profondeur de la barre. Si cet écart est uniquement dû à une erreur sur la vitesse du son, on peut, sur certains types de sondeur, le corriger par un simple réglage du capteur. Cependant, beaucoup d'appareils ont un fonctionnement basé sur une présumée vitesse du son dans l'eau qui ne peut être modifiée. Dans ce cas, il est possible de corriger des écarts au cours du traitement, après avoir déterminé indépendamment la vitesse réelle du son, de la façon décrite ci-dessus. Lorsque l'on a des sondeurs à vitesse variable et que les profondeurs d'eau à mesurer sont hors de la portée de la barre, on peut convertir une erreur mécanique fixe en pourcentage d'erreur que l'on amplifie à mesure que la profondeur augmente, à condition que l'écart ne soit pas attribuable à une erreur sur la vitesse du son.

Marées et niveaux d'eau

Dans cette section, nous donnons un aperçu général de l'importance des marées et des niveaux d'eau pour les levés

hydrographiques. Chacun des bureaux régionaux du Service hydrographique du Canada a une équipe spécialisée dans l'étude des marées et des niveaux d'eau dans la région à laquelle il est affecté.

Pour obtenir des informations précises au sujet des marées et des niveaux d'eau, on s'adressera aux organismes suivants:

a) Bureau de l'hydrographe fédéral
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E6

b) Regional Tidal Superintendent — Région du Pacifique
Institute of Ocean Sciences
P.O. Box 6000
Sidney (C.-B.)
V8L 4B2

c) Agent d'information sur les marées — Région du Centre
Bayfield Laboratory
P.O. Box 5050
Burlington (Ont.)
L7R 4A6

d) Agent d'information sur les marées — Région de l'Atlantique
Institut d'océanographie Bedford
P.O. Box 1006
Dartmouth (N.-É.)
B2Y 4A2

Les niveaux d'eau varient constamment. Les causes des mouvements de la surface de l'eau sont nombreuses mais, dans les eaux soumises à des marées, les forces ascensionnelles exercées par ce phénomène sont les plus évidentes. Cependant, que les eaux soient affectées ou non par des marées, les influences météorologiques sont toujours fortes. La friction du vent sur la surface de l'eau peut hausser le niveau de l'eau sous le vent. Les variations de la pression barométrique sur une large étendue d'eau a pour effet d'en incliner la surface. Dans certaines circonstances, une oscillation des lacs et des baies à la fréquence de résonance imprime à la surface de ces eaux un mouvement de pendule, phénomène que l'on appelle seiche. En outre, les courants de décharge et l'abaissement du niveau des lacs peuvent faire varier le niveau d'eau sur la période de trois ou quatre mois que dure un levé hydrographique.

Étant donné que les sondes mesurées au cours de levés hydrographiques sont réduites à des profondeurs situées sous un plan de référence commun (zéro des sondes), il est nécessaire au cours du levé de relever toutes les causes de l'élévation de la surface de l'eau par rapport à ce plan.

Plans de référence

Lorsque l'on choisit un niveau de référence des sondes, il faut tenir compte des facteurs suivants:

a) Le zéro des sondes doit être suffisamment bas pour que, dans des conditions météorologiques normales, il y ait toujours au moins la "profondeur sur la carte".
b) Le zéro des sondes ne doit pas être bas au point de donner une idée trop pessimiste de la profondeur minimale à observer.

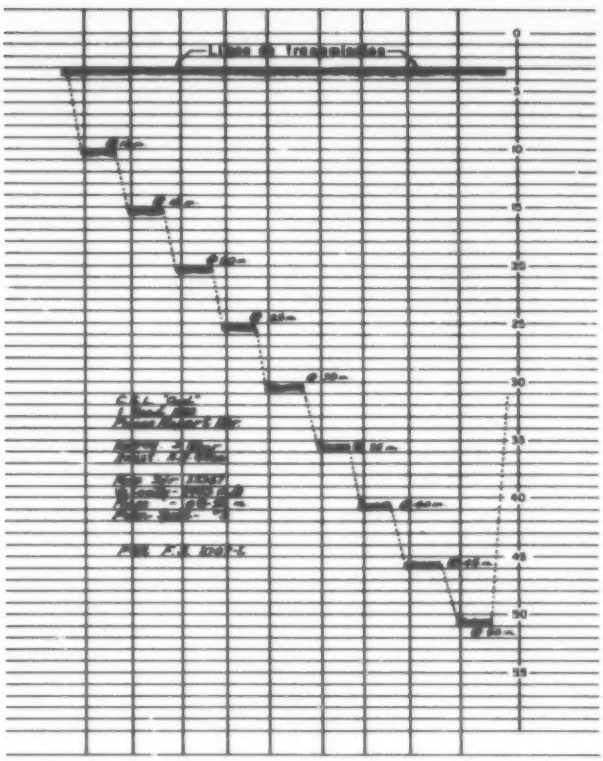


Figure 35
Enregistrement typique de la vérification manuelle

c) Le zéro des sondes doit être voisin des surfaces de référence utilisées dans des levés adjacents.

Le Bureau hydrographique international recommande que le zéro des cartes soit un plan suffisamment bas pour que la marée tombe le moins souvent possible sous ce niveau. Dans le cas des eaux à marée, le Service hydrographique du Canada a adopté le niveau correspondant au maximum de la basse mer inférieure comme le zéro des cartes, et le niveau correspondant au maximum de la pleine mer supérieure comme le plan de référence des hauteurs. La surface de référence varie d'un endroit à l'autre selon l'amplitude de la marée. La Figure 36 illustre divers plans de référence utilisées dans des eaux à marée.

Définitions

a) *Maximum de la pleine mer supérieure* — Le niveau de la plus haute des marées prévisibles.

b) *Moyenne de la pleine mer supérieure* — Moyenne des hauteurs de marée prévues de la haute mer prévisible de chaque jour.

c) *Moyenne de la basse mer inférieure* — Moyenne des hauteurs de marée prévisibles de la basse mer inférieure de chaque jour.

d) *Maximum de la basse mer inférieure ou niveau ordinaire de la plus basse mer* — La plus basse des marées prévisibles.

e) *Niveau moyen de l'eau* — Moyenne des niveaux horaires mesurés sur une certaine période d'observation.

f) *Niveau moyen de la mer* — Moyenne des niveaux horaires mesurés sur une période de plusieurs années d'observation.

g) *Niveau moyen de la marée* — Moyenne de toutes les basses et hautes mers mesurées sur une certaine période d'observation.

h) *Zéro des cartes* — correspond au maximum de la basse mer inférieure.

i) *Altitude sur la carte* — distance verticale entre un objet et le plan de référence correspondant au maximum de la haute mer supérieure.

j) *Hauteur* — Distance verticale entre la partie supérieure d'un objet et le niveau du sol

k) *Profondeur sur la carte* — Distance verticale entre le zéro des cartes et le fond de la mer.

l) *Sonde découvrante* — Distance verticale d'un objet comptée au-dessus du zéro des cartes. Elle ne peut dépasser le niveau de la pleine mer.

Indicateurs du niveau d'eau

Dans la présente partie, nous nous intéressons surtout aux principes de fonctionnement des indicateurs du niveau d'eau. Dans presque tous les cas, les données sont enregistrées automatiquement sous forme numérique ou analogique et peuvent être mémorisées ou transmises, selon le cas. Les indicateurs les plus utilisés par le Service hydrographique du Canada sont:

1) Échelle de marée — Perche graduée maintenue verticalement, montée en permanence à l'intérieur de la zone de marnage, sur laquelle la lecture est prise directement.

2) Marégraphe à flotteur dans un puits en communication avec la mer. Le flotteur suit les mouvements de l'eau et entraîne un dispositif d'enregistrement. L'orifice d'entrée du puits amortit les signaux indésirables, comme la houle du vent. (A cette fin, le rapport de la surface de l'orifice d'admission à la surface de la section transversale du puits est généralement de l'ordre de 1/100).

3) Divers types de marémètre à pression:
   (a) Diaphragme à caoutchouc submergé relié par un tube capilaire à un élément sensible à la pression (tube de Bourdon), qui est couplé à un enregistreur à bande.
   (b) Cristal de quartz à fréquence de résonance sensible à la pression. Il est placé dans des marémètres autonomes, complètement submersibles, qui sont

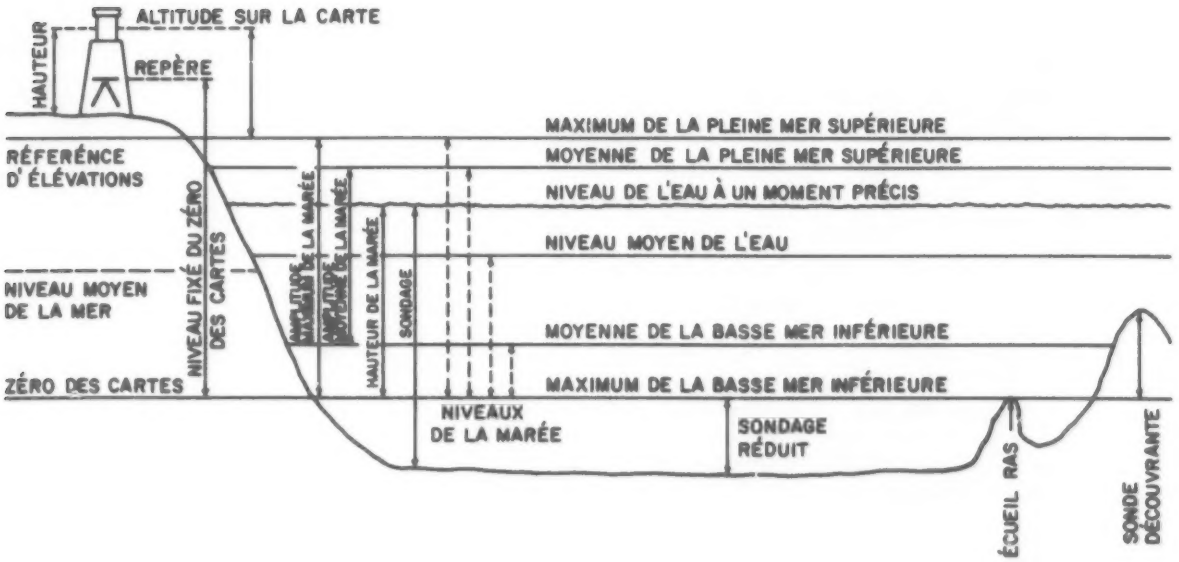


Figure 36
Plans de référence et variations des niveaux de l'eau dans des eaux à marée

souvent fixés à des amarres ancrées au fond de la mer.

4) Indicateur à barbotage. Un manomètre mesure la hauteur manométrique à l'extrémité d'un tube rempli d'air qui repose sur le fond marin. Une pompe fait circuler continuellement de l'air à travers le tube. Le manomètre peut être relié à un enregistreur à bande.

Pour de plus amples informations sur la façon d'installer un marémètre temporaire et sur les endroits où on peut le faire, on consultera le guide des marées du Service hydrographique du Canada (1970).

Surfaces de référence des eaux à marée

Dans la plupart des eaux à marée du Canada, à l'exception de l'extrême Arctique, un zéro des cartes (niveau correspondant au maximum de la basse mer inférieure) a été établi à de nombreux endroits à la suite de longues périodes d'observation de la marée. Des repères ont été installés à ces endroits et les altitudes des repères au-dessus du zéro des cartes et, dans la plupart des cas, au-dessus du niveau de référence géodésique canadien ont été publiées. Le zéro des cartes peut donc être retrouvé soit par nivellement à partir d'un repère établi, soit par transposition à partir d'un marémètre de référence approprié. Dans les eaux à marée, le niveau réel de la surface de référence diffère d'un endroit à l'autre en fonction de la nature et de l'amplitude des marées.

Dans la Figure 37, une côte ouverte est citée en exemple. Dans ce cas-ci, on peut supposer que le niveau moyen de la mer est une surface relativement de niveau le long de la côte. Lorsque l'amplitude de la marée augmente et que le maximum de la basse mer inférieure s'abaisse par rapport au niveau moyen de la mer, la hauteur du zéro des cartes diminue en conséquence. En pratique, le zéro des cartes est modifié comme il est indiqué. Une différence de 0,5 mètre entre deux endroits signifie généralement que le plan de référence doit être changé entre les deux.

Établissement du zéro des cartes au cours des levés dans des eaux à marée

Pour retrouver une surface de référence, on installe les marémètres de façon à ce que le niveau de la plus basse mer ne soit pas au-dessous du zéro de l'échelle des marées ou du diaphragme de l'indicateur à pression, et on tire des lignes horizontales entre les repères existants et les marémètres. La réduction des sondes rapportées aux niveaux d'eau mesurés à cet endroit doit être limitée à la zone où le zéro des cartes est fiable.

Si le zéro des cartes n'a pas déjà été établi dans la zone du levé, il faut le calculer d'après la lecture d'un marémètre de référence où sont enregistrées des hauteurs d'eau rapportées à un zéro des cartes. On pourra obtenir des conseils sur la façon de procéder en s'adressant aux bureaux régionaux des marées.

Cartes de lignes cotidales

Une autre façon de réduire des sondes à des surfaces de référence pendant des levés hydrographiques consiste à utiliser des cartes de lignes cotidales. Ces cartes comportent deux séries de lignes, la première joignant tous les points où l'amplitude de la marée est la même, et la seconde joignant tous les points où les basses mers et les pleines mers ont lieu à la même heure.

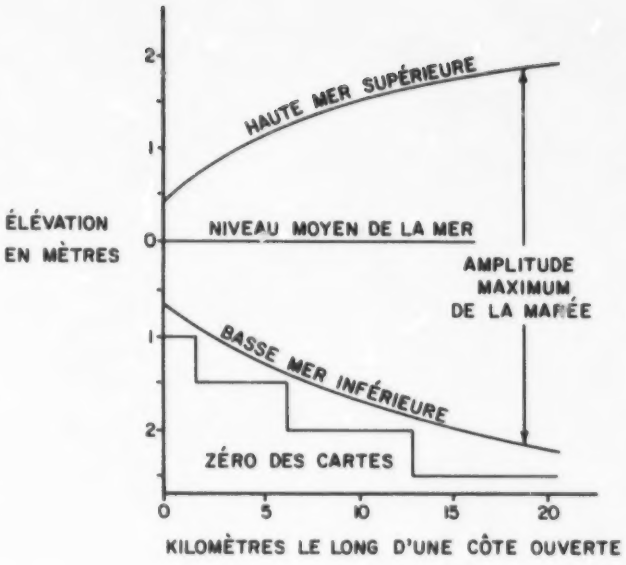


Figure 37
Plan de référence et niveaux de l'eau le long d'une côte ouverte

La Figure 38 montre une carte de lignes cotidales semi-diurnes. Toutes les lignes cotidales sont rapportées à la marée observée au port de référence A, où l'amplitude est importante par rapport à celle qui est observée dans la plupart des autres ports d'observation. Sur les lignes continues sont indiquées les corrections à apporter aux heures de la marée de A; ainsi, l'heure de la pleine mer ou de la basse mer en B précède de 30 minutes celle qui a lieu en A, tandis qu'en C, la pleine mer ou la basse mer survient 30 minutes plus tard. Les lignes d'égale amplitude, représentées par des tirets, sont rapportées au marnage en A; c'est ainsi qu'au point B, l'amplitude des marées équivaut à 0,65 fois l'amplitude mesurée en A. Dès lors, on peut réduire les sondes obtenues en D d'après la lecture des marémètres en A, en ajoutant 15 minutes à toutes les heures et en multipliant toutes les hauteurs par 0,68; on obtient ainsi une ligne cotidale.

Les données sur lesquelles les cartes de lignes cotidales sont aujourd'hui basées proviennent en majeure partie d'observations côtières. C'est pourquoi les extrémités terrestres des lignes cotidales devraient avoir une bonne exactitude. En revanche, peu d'observations de la marée ont été faites au large des côtes, de sorte qu'en mer, les lignes cotidales doivent habituellement être interpolées entre des observations faites sur la côte. Plus les observations faites à bord de navires ou à l'aide de marémètres marins seront nombreuses, meilleures seront les cartes de lignes cotidales marines.

Construction d'une carte de lignes cotidales

Pour dresser une carte de lignes cotidales semi-diurnes, il faut connaître les décalages de temps et les rapports des amplitudes à au moins 3 positions appropriées. Dans la mesure du possible, les positions doivent englober la zone du sondage dans

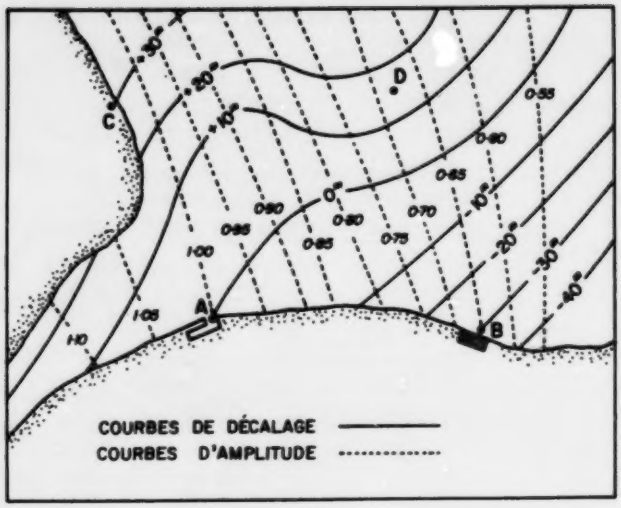


Figure 38
Carte de lignes cotidales semi-diurnes

un triangle équilatéral. La précision de la carte augmentera en proportion du nombre de positions choisies.

La Figure 39 montre une vaste zone de levé qui s'étend sur 20 à 50 kilomètres au large des côtes. Dans ce secteur, les sondes seront rapportées aux observations faites en A, où un zéro des cartes est déjà établi. Les décalages de temps et les rapports d'amplitude en B, C, D, E et F par rapport à A sont connus.

Pour construire une carte de lignes cotidales à l'aide de ces informations, on procède comme suit:

(1) On joint par des lignes droites des stations d'observation de la marée et, sur ces lignes, on interpole des décalages de temps. Les lignes et heures interpolées sont indiquées dans la Figure 39(a).
(2) On trace des courbes de décalage, représentées dans la figure par des lignes foncées; on peut voir que la zone du levé est bien couverte.
(3) On trace des courbes d'amplitude et on obtient les résultats illustrés dans la Figure 39(b).

L'arpenteur qui trace ces courbes doit faire preuve de beaucoup de jugement s'il veut minimiser les erreurs. On notera que le point interpolé 0,90 sur la ligne BE, dans la Figure 39(b), a été laissé de côté, la préférence ayant été donnée à son voisin sur la ligne AC. Les points interpolés sont toujours plus fiables lorsque la ligne sur laquelle ils se trouvent recoupe les courbes suivant un angle large. De plus, une ligne courte est toujours plus exacte qu'une ligne longue.

Supposons maintenant que des observations de la marée aient eu lieu uniquement en A, B et D. Il est encore possible de tracer des lignes cotidales, mais celles-ci ne seront pas aussi exactes que dans le cas précédent. Considérons les lignes DE et EA dans la Figure 39(b). Si, sur ces lignes, on exécutait des interpolations en ne tenant pas compte de la valeur observée en E, le reste serait assez différent des résultats indiqués.

Marées dans les eaux canadiennes

Côte est

Côte sud de Terre-Neuve, côte sud-est de la Nouvelle-Écosse et baie de Fundy (Figures 40, 41 et 42)

Le long de la côte de l'Atlantique, entre le cap Race et le cap Ray, à Terre-Neuve, jusqu'à Glace Bay, en Nouvelle-Écosse, et le long des côtes de la Nouvelle-Écosse et du Nouveau-Brunswick, la marée est semi-diurne. La pleine mer a lieu presque en même temps en tous les points de la côte, de la baie Placentia, Terre-Neuve, jusqu'à Shelburne, Nouvelle-Écosse. Le marnage n'est pas très important, l'écart entre la pleine mer et la basse mer dépassant rarement 2 mètres. Autour de l'extrémité sud de la Nouvelle-Écosse, on observe des variations rapides de l'heure de la pleine mer et de l'amplitude de la marée.

La marée la plus remarquable, non seulement au Canada mais probablement partout dans le monde, a lieu dans la baie de Fundy, où le marnage atteint plus de 12 mètres. Cette amplitude exceptionnelle est entièrement attribuable à une combinaison particulière de facteurs géographiques.

Côte est de Terre-Neuve et du Labrador (Figures 40, 41 et 42)

Le long de la côte est de Terre-Neuve et sur la côte du Labrador, jusqu'à Cartwright, la marée est mixte, mais surtout semi-diurne. Elle devient de plus en plus semi-diurne à mesure que l'on progresse vers le nord, et l'est entièrement au Cap Chidley, le point le plus au nord du Labrador. La pleine mer a lieu presque en même temps le long du Labrador et sur la côte est de Terre-Neuve, et l'amplitude de la marée est d'environ 1 mètre. Cependant, le marnage augmente considérablement en direction de l'extrémité nord du Labrador (détroit de Davis).

Golfe du Saint-Laurent (Figures 40, 41 et 42)

La marée qui entre dans le golfe du Saint-Laurent par le détroit de Cabot et le détroit de Belle-Isle est mixte, mais surtout semi-diurne, sauf le long de la côte entre Cap-Tourmentin et Richibucto, au Nouveau-Brunswick, et près du port Savage, à l'Île-du-Prince-Édouard, où des inégalités diurnes dominent. A la pointe sud des Îles-de-la-Madeleine et près de la pointe Crossman, au Nouveau-Brunswick, la marée est entièrement diurne, une seule pleine mer et une seule basse mer ayant lieu chaque jour. Le marnage à travers le golfe est inférieur à 2,4 mètres.

Arctique

Détroit d'Hudson, baie d'Hudson et bassin Foxe (Figures 40 et 43)

Dans toute cette région, la marée est semi-diurne, sauf dans la bande qui sépare Povungnituk du port Harrison, sur la côte nord-est de la baie d'Hudson et à Hall Beach, dans le bassin Foxe, où le rythme semi-diurne de la marée est brisé par de larges variations diurnes.

Le détroit d'Hudson fait communiquer l'océan et une vaste mer "intérieure"; de plus, il est beaucoup plus étroit en son centre qu'à ses deux extrémités. Ces facteurs influent sur l'amplitude de la marée dans ce passage; le long de la côte nord, le

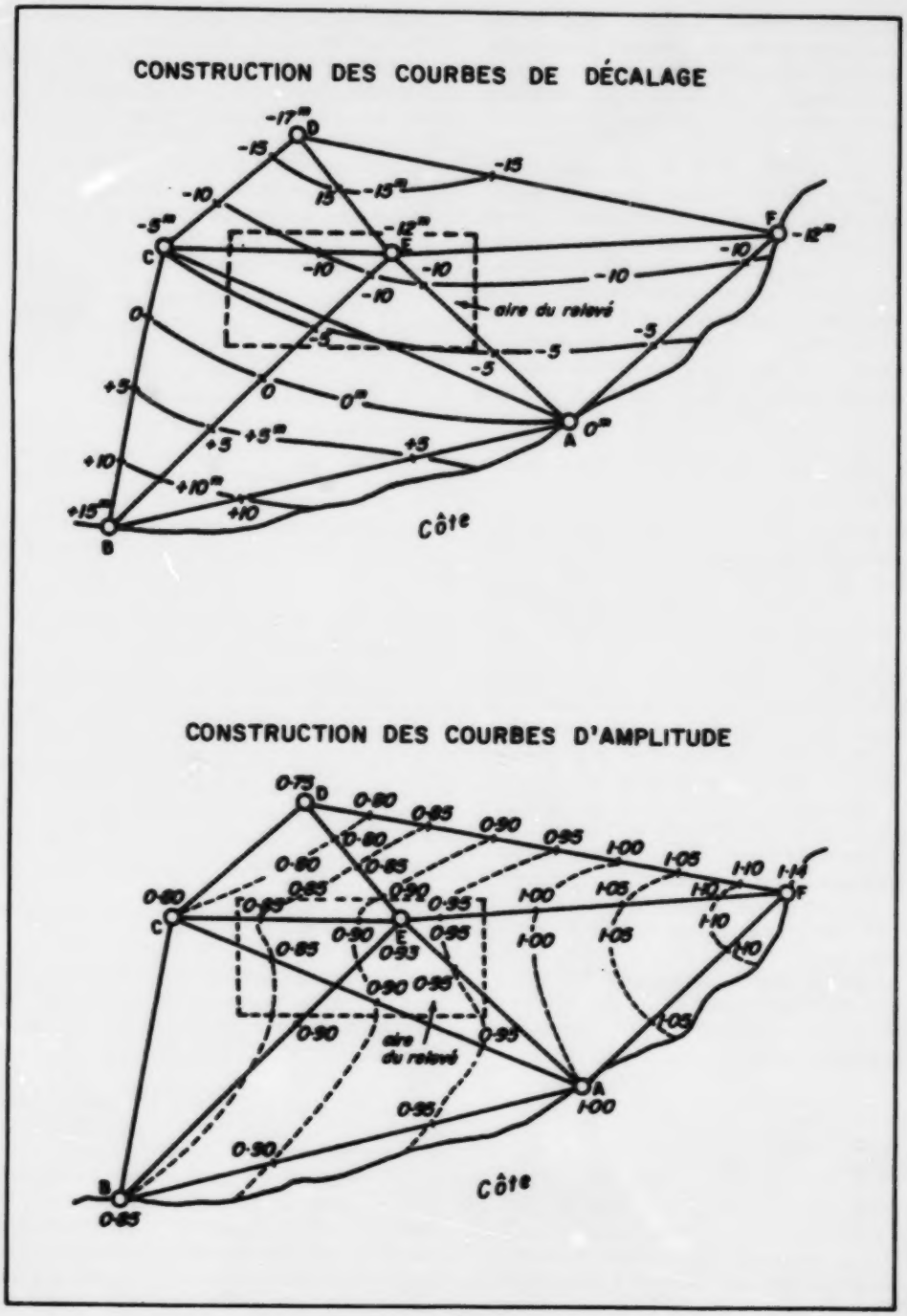


Figure 39
Construction d'une carte de lignes cotidales

marnage passe de 5,5 mètres à environ 9 mètres à l'inlet Ashe et revient à 5 mètres aux environs du port Schooner. Dans la baie d'Ungava, la marée provenant de l'Atlantique augmente rapidement en direction de l'extrémité de la baie, son amplitude moyenne atteignant 12 mètres au bassin Leaf.

Dans la baie d'Hudson, la marée décrit un mouvement à peu près circulaire; suivant le tracé de la côte, elle part de l'extrémité nord-ouest de la baie, descend le long de la côte ouest et va presque mourir le long de la côte est. Dans l'entrée de la baie, l'amplitude moyenne de la marée est de 2 mètres, augmente à 4 mètres le long de la côte ouest et décroît progressivement le long des côtes sud et est pour tomber à environ 0,3 mètre à Port-Harrison. L'augmentation et la diminution de la hauteur de la marée sont parfois embrouillées, en particulier près de l'embouchure de la baie James, par des phénomènes météorologiques qui élèvent ou abaissent le niveau de la mer de quelques mètres.

Détroit de Davis, baie Baffin et détroit de Lancaster, côte ouest de l'Arctique (Figures 40 et 44)

L'amplitude de la marée qui, comme nous l'avons fait remarquer, augmente vers le nord jusque dans le détroit de Davis, diminue à nouveau dans la baie Baffin et devient presque nulle vers le milieu de l'île Baffin. De là, elle augmente progressivement en direction du détroit de Smith et du détroit de Lancaster.

La pleine mer a lieu presque en même temps le long des côtes mais, dans la baie Baffin, la pleine mer à l'entrée sud coïncide avec la basse mer à l'extrémité nord. Dans le détroit de Smith, le marnage est d'environ 3 mètres et, dans le détroit de Lancaster, à Resolute, l'amplitude moyenne est de 1,2 mètre. Dans les inlets qui débouchent dans le détroit de Lancaster, on observe une amplitude moyenne inférieure à 2 mètres.

A l'ouest du détroit de Barrow, dans l'Arctique, le marnage est faible, ne dépassant pas les variations du niveau de la mer attribuables à des causes météorologiques.

Même si le Service hydrographique du Canada poursuit continuellement des travaux d'exploration et de levé dans l'Arctique canadien, les données sur les marées sont encore assez limitées. C'est pourquoi les caractéristiques des marées indiquées dans la Figure 40 ne s'appliquent qu'aux rares endroits où des observations ont été faites.

Côte ouest

Côte ouest de l'île de Vancouver et Îles de la Reine-Charlotte (Figures 40 et 45)

Dans les deux tiers nord de la côte ouest de l'île de Vancouver, entre le détroit de Barkley et le cap Scott, la marée a lieu presque en même temps et présente une amplitude de 3 mètres. Le marnage augmente légèrement à mesure que la marée remonte dans les nombreux inlets de l'île, sans ralentissement toutefois, sauf dans le détroit de Quatsino où, en raison de l'exiguïté du passage, la marée survient 45 minutes plus tard que celle observée ailleurs sur la côte.

Le long de la côte ouest des îles de la Reine-Charlotte et sur la côte continentale du détroit de la Reine-Charlotte, la pleine mer a lieu presque en même temps, environ 30 minutes plus tard qu'à l'île de Vancouver. En raison de la faible profondeur de détroit, le marnage augmente le long du continent; cet effet est amplifié dans les inlets profonds où, aux embouchures, le marnage atteint 5 mètres.

Détroit d'Hécate (Figures 40 et 46)

Du détroit de la Reine-Charlotte, la marée se propage vers le nord jusque dans le détroit d'Hécate et augmente d'amplitude en raison de la faible profondeur du passage. Autour de la pointe nord-est de l'île Graham, la marée ralentit, de sorte qu'elle atteint l'inlet Masset environ une heure plus tard que dans le détroit d'Hécate. Sur la côte continentale du détroit, le décalage de temps et le marnage augmentent du sud au nord; à Prince-Rupert, la marée se produit environ une heure plus tard qu'à l'île de Vancouver et a une amplitude de 5 mètres. L'onde de marée qui se propage dans les inlets atteint l'extrémité à peu près 10 minutes plus tard qu'à l'entrée, avec une légère hausse d'amplitude.

Détroit Juan de Fuca et détroit de Géorgie (Figures 45 et 46)

Il faut environ 6 heures à l'onde marée pour remonter le détroit Juan de Fuca et atteindre le détroit de Géorgie. L'amplitude, qui est de 2 mètres à l'embouchure du détroit, augmente en direction de Victoria, pour atteindre 3,8 mètres à l'extrémité nord du détroit de Géorgie. L'ensemble du détroit peut être considéré comme un seul et même bassin de marée, le décalage de temps entre n'importe quel point de ses côtes et la pointe Atkinson, à Vancouver, ne dépassant pas 30 minutes.

Détroit de la Reine-Charlotte et détroit de Johnstone (Figure 45)

Ce passage étroit et parsemé d'îles qui sépare la partie nord de l'île de Vancouver du continent est le siège de deux courants de marée, le premier provenant du détroit de la Reine-Charlotte au nord, et l'autre provenant du détroit de Géorgie au sud.

Étant donné que la marée provenant du nord prend environ 3 heures de plus que la marée du sud pour atteindre les parties les plus étroites du chenal qui sépare l'île de Vancouver du continent, un violent courant alternant se forme dans le passage, en particulier dans les goulets tels que Seymour, Okisollo, Surge, Hole-in-the-Wall, Yuculta et Arran Rapids. L'amplitude de la marée du nord présente de larges variations, en raison de la forme très irrégulière du chenal; l'amplitude moyenne est de 4 mètres à Alert Bay, atteint 5 mètres à l'inlet Knight et se remet à décroître à mesure que le chenal se rétrécit.

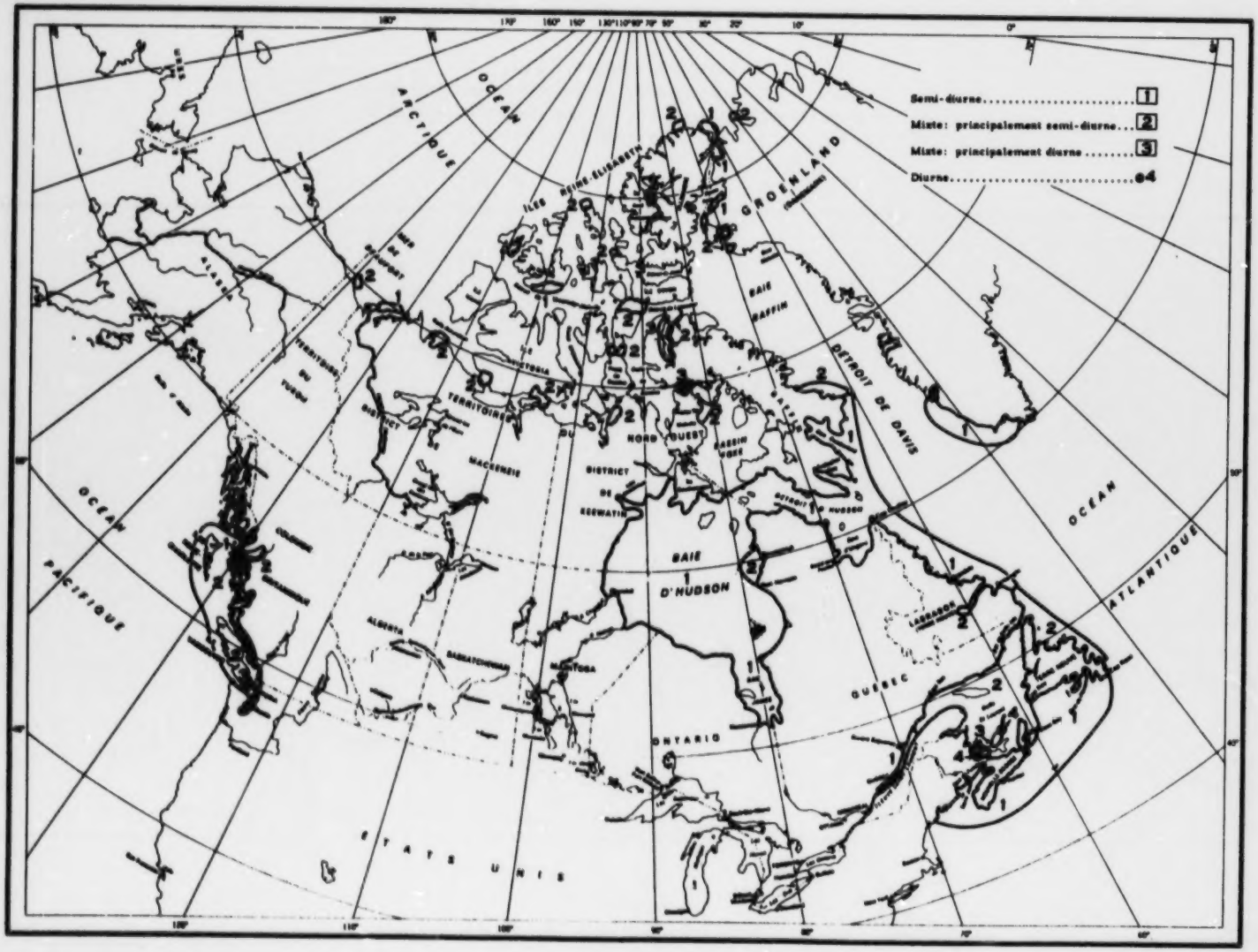


Figure 40
Classification des marées canadiennes

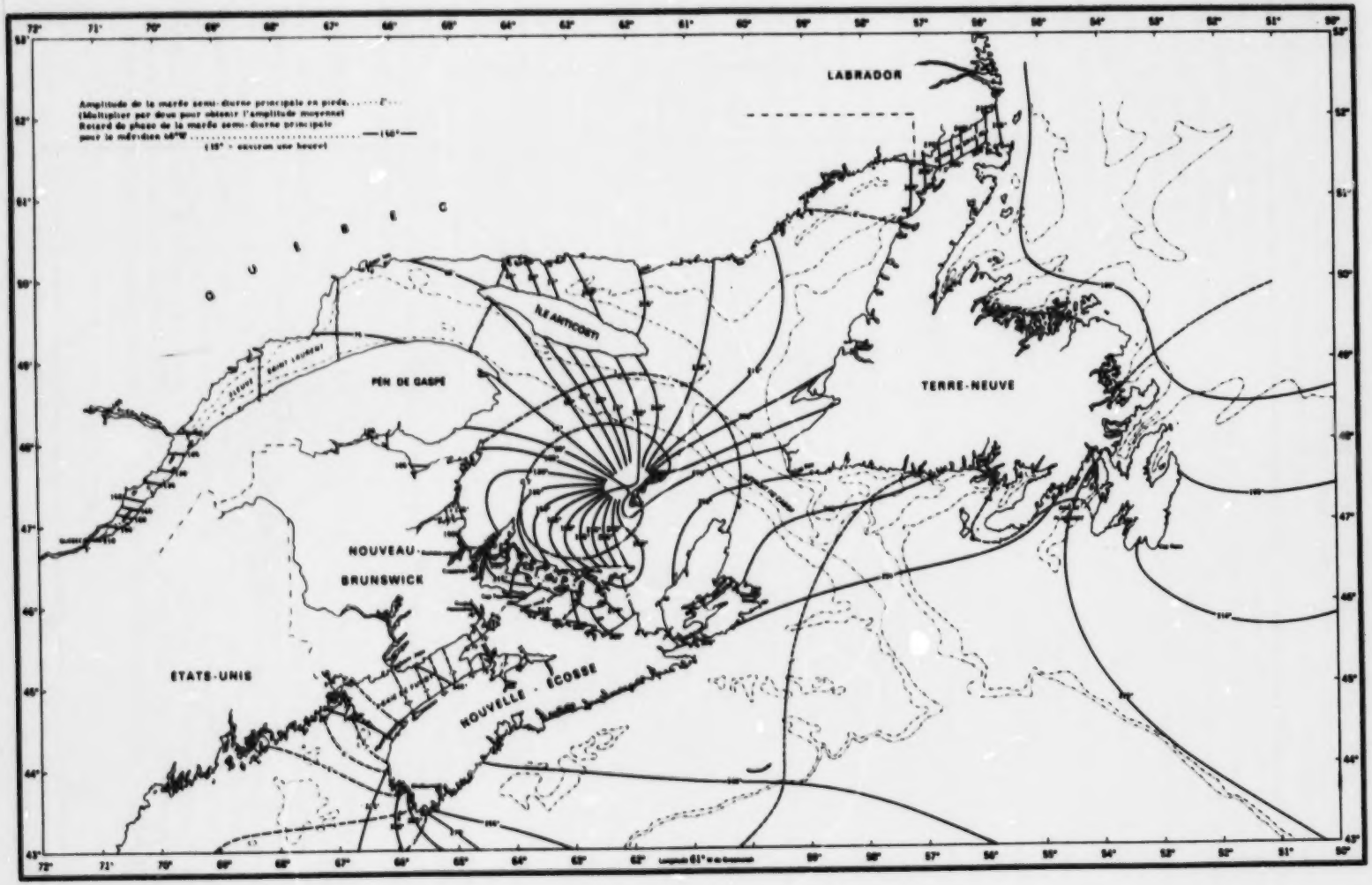


Figure 41
La progression moyenne des marées semi-diurnes dans le Golfe du Saint-Laurent et au large des côtes de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Écosse

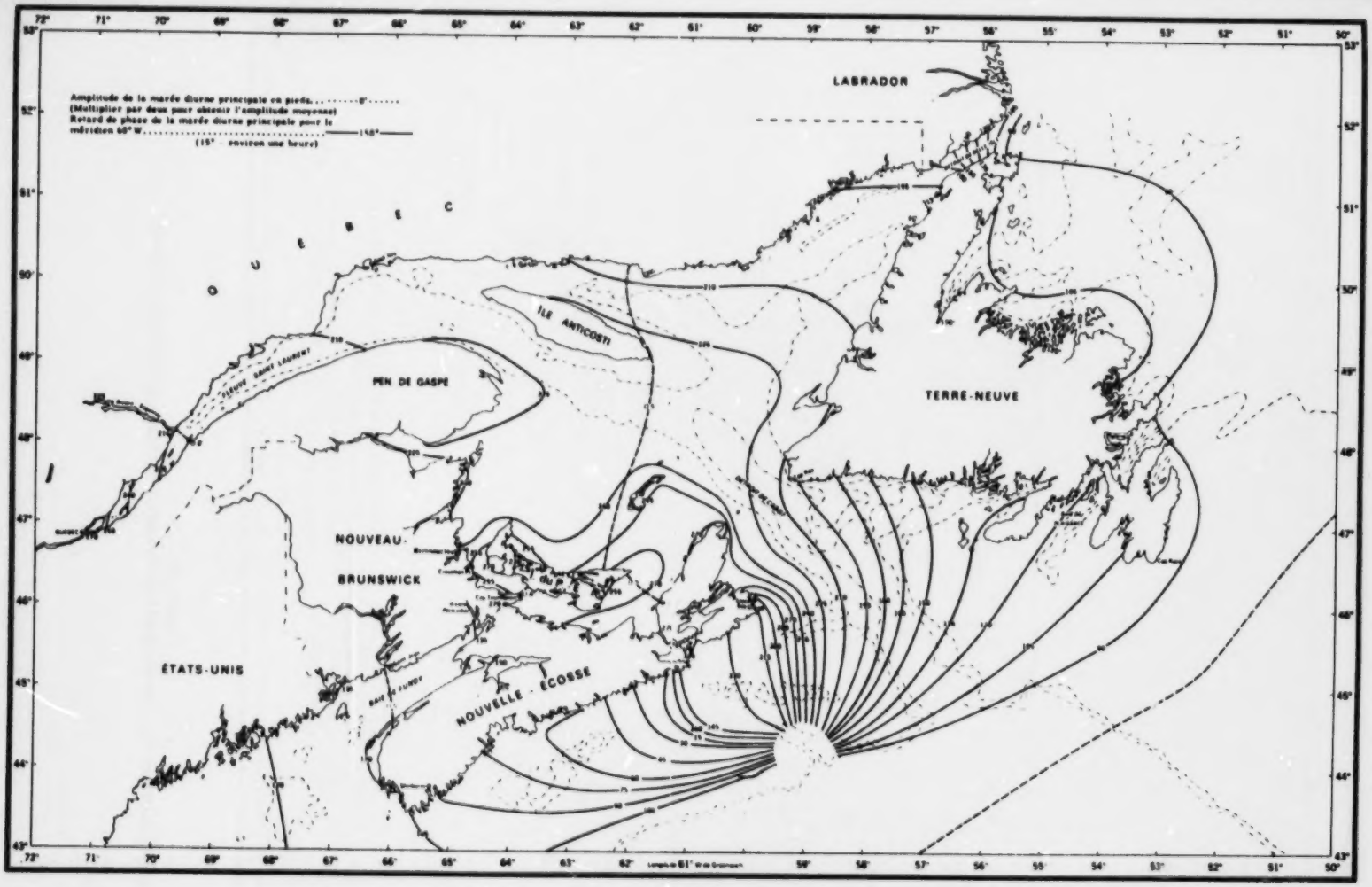


Figure 42
La progression moyenne des marées diurnes dans le Golfe du Saint-Laurent et au large des côtes de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Écosse

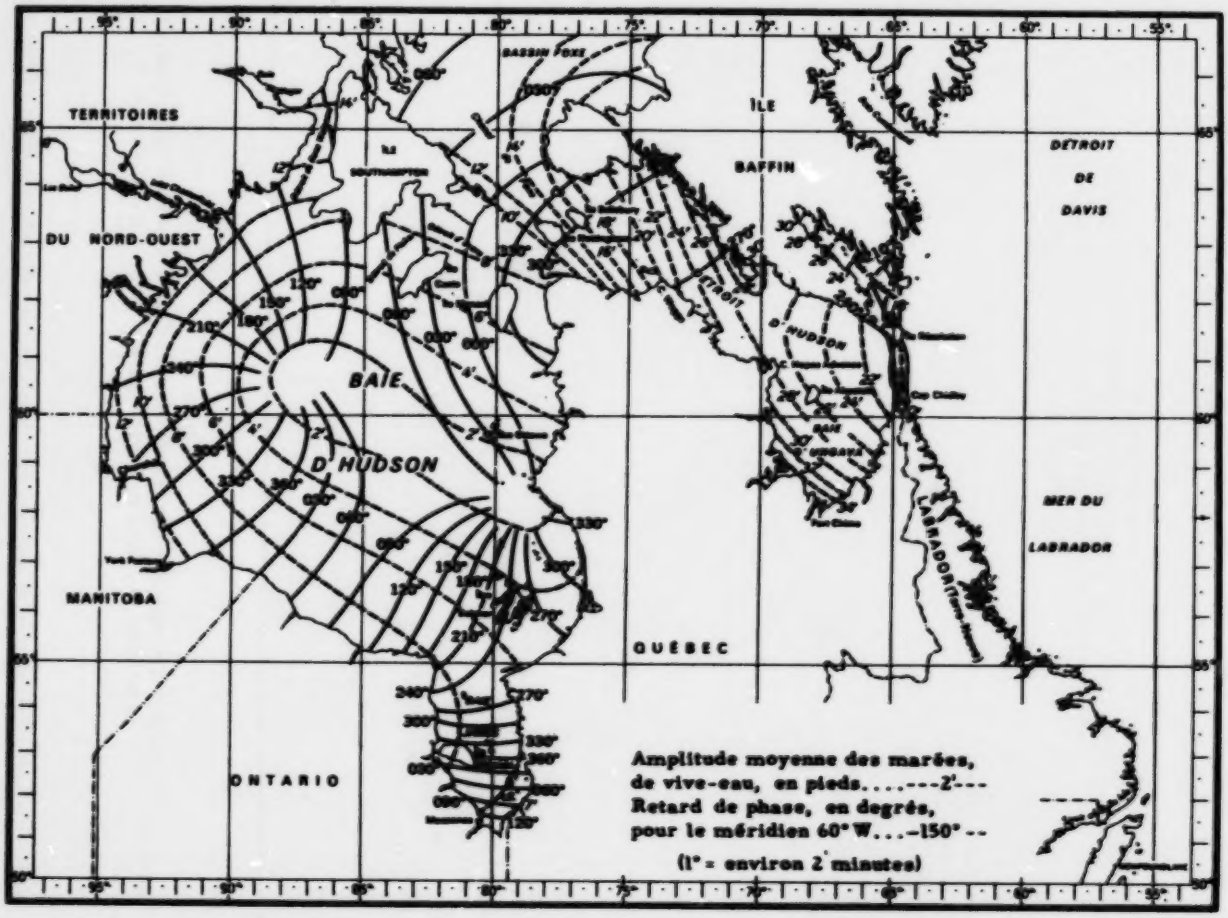


Figure 43
La progression moyenne des marées dans le Détroit d'Hudson et la Baie d'Hudson

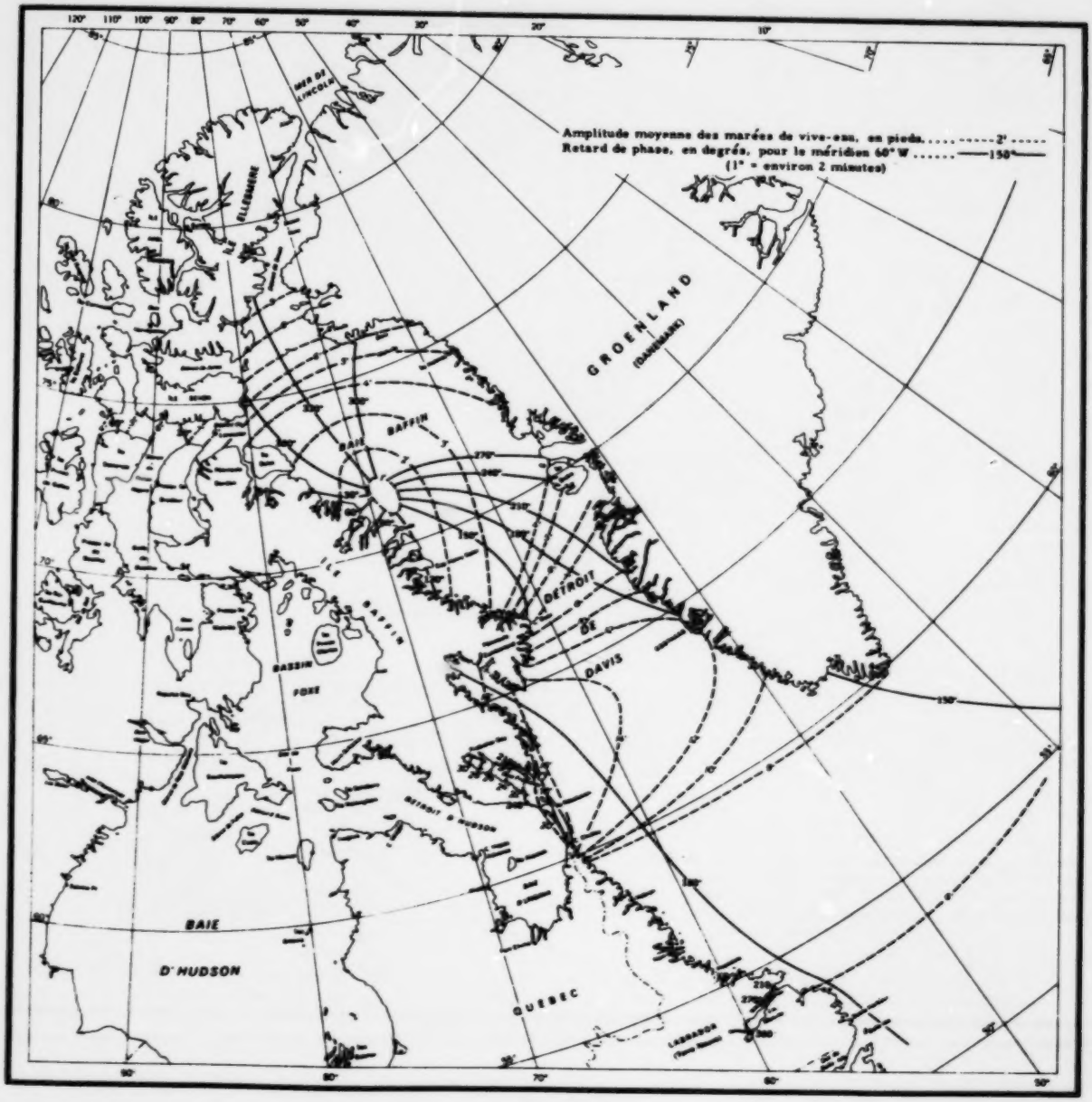


Figure 44
La progression moyenne des marées de Terre-Neuve à la Baie de Baffin

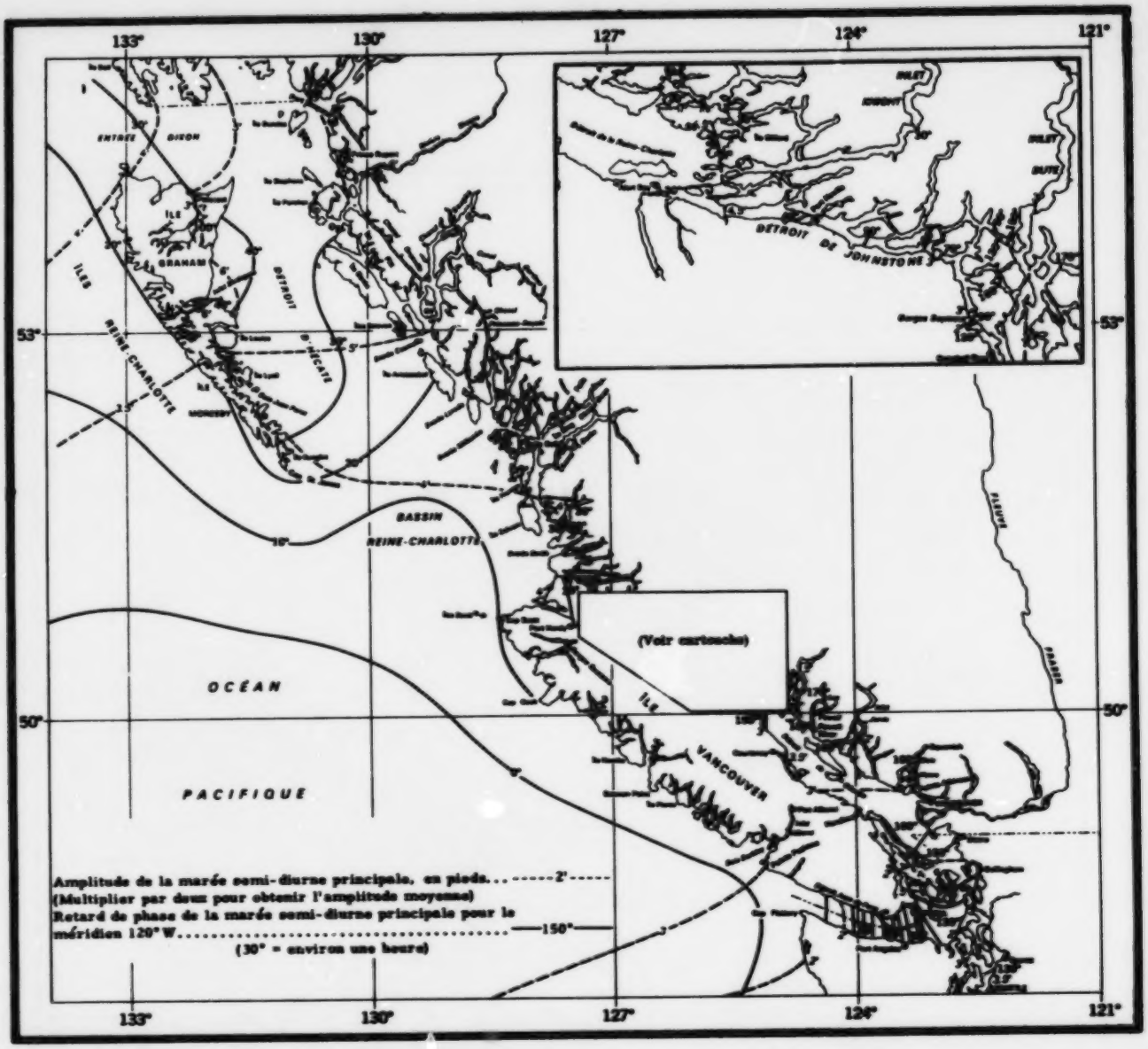


Figure 45
La progression moyenne des marées semi-diurnes sur la côte pacifique

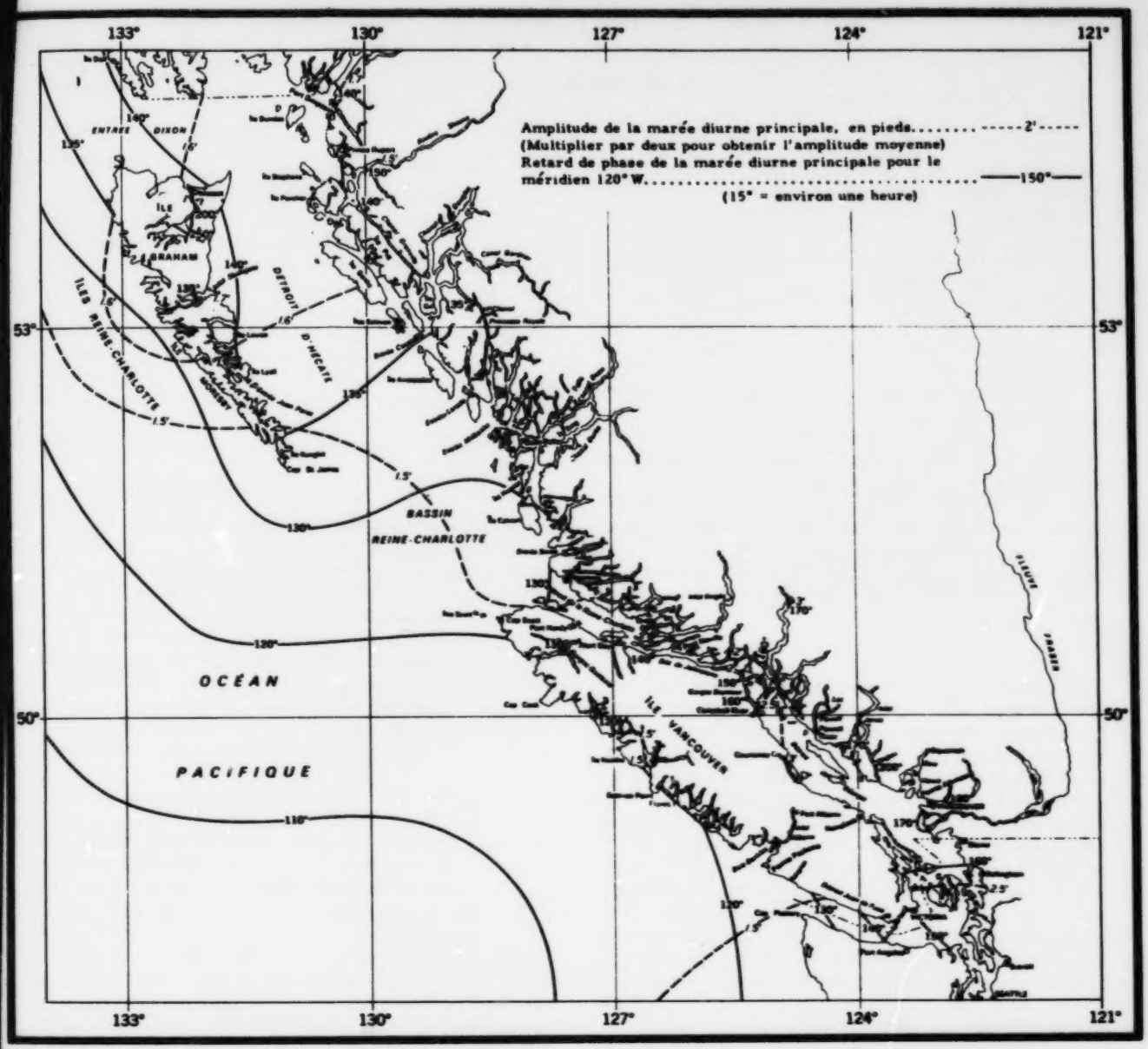


Figure 46
La progression moyenne des marées diurnes sur la côte pacifique

Chapitre 11

Les levés géophysiques

Introduction

Les méthodes de levé géophysique sont indispensables dans toutes les phases de l'exploration pétrolière en mer. Ce sont elles qui permettent à l'industrie de délimiter des zones d'intérêt et, par la suite, d'établir sur les fonds marins un lieu de forage convenable où les travaux peuvent être exécutés en toute sécurité. Puis, si un forage s'avère productif, l'industrie a à nouveau recours à des levés géophysiques pour déterminer les limites probables du nouveau réservoir. Dans ce chapitre, nous nous proposons de donner un bref aperçu du matériel et des méthodes de prospection géophysique utilisés en milieu marin.

Méthodes basées sur le champ potentiel

Levés magnétométriques

La méthode de prospection géophysique la plus simple et la plus facile à mettre en oeuvre est le levé au magnétomètre, en particulier le levé aéromagnétométrique. C'est la plus facile, parce qu'elle consiste généralement à transporter, au bout d'un câble relié à l'aéronef ou dans une enceinte extérieure située à un endroit stratégique, un magnétomètre qui mesure continuellement les variations du champ magnétique terrestre, pendant que l'aéronef parcourt un réseau de lignes de vol à une altitude constante. Une technique analogue peut également être utilisée sur des bateaux. Dans les deux cas, les aides à la navigation habituelles suffisent à déterminer les positions des lignes de levé.

Les magnétomètres peuvent donc être fixés au sol, ou encore embarqués à bord d'un aéronef ou d'un bateau. Les magnétomètres au sol servent à mesurer les composantes verticales ou horizontales du champ magnétique terrestre ou, parfois, son intensité totale. Étant donné que la mesure des composantes verticales et horizontales nécessite un bon alignement du magnétomètre et que cette condition ne peut être réalisée sur des plate-formes en mouvement, seule l'intensité totale est mesurée sur les navires ou les aéronefs.

Les levés au magnétomètre sont conçus pour mesurer des variations du champ magnétique de la Terre, généralement de l'ordre de 50 000 gammas, qui sont causées par des variations de la susceptibilité et de la polarisation de masses rocheuses à l'intérieur ou au-dessous de la section sédimentaire. Ces variations sont de l'ordre de 100 à 1 500 gammas. Les variations dues au relief local sont également mesurables et sont de l'ordre de 5 à 50 gammas. De l'interprétation de ces variations, les scientifiques déduisent la profondeur, la taille et l'orientation approximatives des formations qui en sont la cause. Cette information peut leur permettre de déterminer la profondeur du socle magnétique, ainsi que sa configuration générale. Ainsi, il leur est possible de définir la forme des bassins sédimentaires.

Il existe six types de magnétomètres qui mesurent l'intensité totale: à vanne de flux, à résonance nucléaire, à résonance protonique, à vecteur, à pompage optique et à rayon cathodique.

L'interprétation des levés au magnétomètre s'effectue généralement en analysant les profils enregistrés et les cartes, et en comparant leurs particularités aux effets théoriquement produits par des masses de diverses formes, tailles et profondeurs simples. On emploie de nombreuses méthodes analytiques telles que le prolongement vers le haut ou vers le bas du champ magnétique observé, l'analyse des dérivées secondes et d'ordre plus élevé, l'analyse résiduelle et l'application de règles simples d'approximation des profondeurs comme celles de Peter, de Sokolov, de Tilburg, de Hannel et d'autres.

Cette méthode est en soi ambiguë puisque des corps magnétiques de différentes formes, tailles, susceptibilités et polarités peuvent produire des observations très voisines. Les orages magnétiques causés par l'activité des taches solaires engendrent un "bruit" très intense, qui produit des données inutilisables et oblige les prospecteurs à interrompre leur travail.

Les levés au magnétomètre effectués à bord de navires sont généralement associés à d'autres levés géophysiques. Ils se comparent dans l'ensemble aux levés aériens, mais ils produisent des données beaucoup moins détaillées. Les levés au magnétomètre sont de moins en moins utilisés, car il s'agit essentiellement de méthodes de reconnaissance.

Levés gravimétriques

Les levés gravimétriques au sol se caractérisent eux aussi par leur simplicité et leur facilité d'exécution, et peuvent être considérés comme des levés de reconnaissance améliorés.

Ils consistent à mesurer les variations du champ de pesanteur de la Terre. Il peut s'agir de mesures absolues, effectuées au moyen de pendules ou de balances à torsion à des stations choisies, ou de mesures relatives effectuées à un grand nombre de stations. Les mesures relatives peuvent être rattachées aux valeurs absolues mesurées à des stations coïncidentes. Il est nécessaire d'apporter de nombreuses corrections aux mesures gravimétriques avant de les utiliser; en effet, il faut tenir compte de la latitude, de l'altitude, de la dérive instrumentale, du terrain et surtout, dans le cas des gravimètres en mouvement, des composantes de l'accélération attribuables au déplacement du véhicule.

Un fois les corrections exécutées, on interprète les mesures pour déterminer la distance approximative et la forme des masses qui sont à l'origine des variations du champ de la pesanteur. Cette méthode ressemble beaucoup aux levés au magnétomètre, sauf qu'elle sert à décrire des anomalies qui sont beaucoup moins profondes et définit mieux la composition des formations.

Il existe deux types de gravimètres d'exploration représentés par les appareils LaCoste-Romberg et Worden.

Les gravimètres placés à bord d'un véhicule en mouvement subissent directement les effets des composantes de l'accélération du véhicule, quelle que soit sa direction. C'est ce que l'on appelle l'effet Eotvos. Ce phénomène constitue un problème très sérieux lorsque les levés gravimétriques sont effectués à bord d'un navire ou d'un aéronef. Dans les airs, la rapidité et l'altitude de l'aéronef engendrent d'autres problèmes, qui rendent le levé à peu près impossible.

Les chercheurs ont mis au point des gravimètres de mer qui sont en grande partie isolés du mouvement du navire; de plus, on emploie des ordinateurs pour supprimer la plupart des accélérations parasites dans les mesures. Les données gravimétriques recueillies en mer sont moins précises que les données obtenues sur la terre ferme, et n'ont pas la distribution spatiale optimale de ces dernières.

Bien que les levés terrestres nécessitent la mise en place d'un canevas altimétrique et planimétrique rigoureux, les aides à la navigation habituelles, moins précises, sont suffisantes pour assurer le positionnement du gravimètre en mer, compte tenu du degré de précision global du levé.

L'interprétation des résultats de la prospection gravimétrique consiste essentiellement à comparer les anomalies observées sur les profils et les cartes à des courbes et cartes théoriques de masses de diverses densités, formes et distances, tout comme dans le cas des levés au magnétomètre. On emploie fréquemment des cartes du champ résiduel ou de dérivées secondes produites à partir des cartes du champ total (cartes des anomalies de Bouguer).

Levés sismiques

Les mesures du champ de la pesanteur et du champ magnétique ont été supplantées presque entièrement par des méthodes de prospection sismique, en particulier dans les travaux d'exploration en mer. Les données sismiques définissent beaucoup mieux l'objet étudié et se prêtent à des analyses et interprétations beaucoup plus poussées.

Il existe essentiellement deux grandes méthodes de prospection sismique: la sismique-réfraction et la sismique-réflexion. La première est beaucoup moins employée que la seconde, qui peut être utilisée de plusieurs façons et à diverses fins.

Levés par sismique-réfraction

La sismique-réfraction consiste à déployer une batterie d'hydrophones à une certaine distance de la source d'énergie, en les disposant de manière à ce que les ondes émises au point de tir se propagent à travers les strates rocheuses suivant des trajectoires horizontales et réfractées et que le moins d'ondes possible soient réfléchies par les formations avant d'atteindre les hydrophones. Dans ce type de levé, l'enregistrement s'effectue généralement en station fixe, mais on emploie aussi fréquemment des hydrophones et des sources de tir mobiles.

En sismique-réfraction mobile, le positionnement est un peu plus compliqué qu'en station fixe ou qu'en sismique-réflexion en route. Le matériel utilisé dans les deux méthodes de prospection est essentiellement identique, et nous en parlerons plus loin.

L'analyse des données obtenues nous renseigne sur la profondeur et sur la vitesse des couches du sous-sol marin. Elle peut servir à délimiter des dômes salifères et fournir des renseignements utiles sur les couches sub-insulaires, où l'enregistrement en sismique-réflexion serait discontinu.

Levés par sismique-réflexion

La méthode de sismique-réflexion est beaucoup plus polyvalente et produit des données beaucoup plus utiles. On y distingue deux types de levés, selon la profondeur de propagation des ondes sismiques: la sismique-réflexion à grande profondeur, employée surtout à des fins de prospection, et la sismique-réflexion à faible profondeur, qui utilise des échosondeurs, des sonars latéraux et des profileurs de sous-sol et qui sert à évaluer des zones destinées à des forages.

La sismique-réflexion à grande profondeur se subdivise en levés à deux dimensions (2D) et à trois dimensions (3D), selon la nature des hydrophones utilisés et les caractéristiques de l'information obtenue. Les enregistrements sismiques 2D permettent de recueillir des données le long d'un profil, ou d'une coupe chronologique, dans un espace à deux dimensions. Les enregistrements 3D s'effectuent suivant des lignes ou profils parallèles et étroitement espacés dans un espace à trois dimensions. Les premiers sont surtout employés pour des travaux de prospection, tandis que les seconds, beaucoup plus coûteux mais combien plus productifs, servent à délimiter des structures découvertes au moyen de levés 2D ou, ce qui est très souvent le cas à ce stade, à circonscrire des réservoirs dont l'existence a été révélée par un ou plusieurs sondages.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les diverses techniques de sismique-réflexion dans l'ordre où elles interviennent généralement dans une campagne de prospection. Nous commencerons donc par la sismique-réflexion 2D à grande profondeur, qui sert à découvrir des réservoirs d'hydrocarbures, nous poursuivrons avec la sismique-réflexion 2D à faible profondeur qui, à l'aide de sonars latéraux et d'échosondeurs, permet de déterminer les zones de forage, puis nous terminerons par la sismique-réflexion 3D qui sert à délimiter le réservoir découvert.

Levés par sismique-réflexion 2D à grande profondeur

La sismographie consiste essentiellement à mesurer le temps de parcours et la forme des ondes réfléchies émises par une source située à proximité de la surface de l'eau, au moment où elles arrivent à la surface. On utilise pour cela des hydrophones qui sont reliés par un câble à des amplificateurs et, de là, à un appareil enregistreur à bande magnétique installé à bord d'un navire.

L'énergie est émise en un "point de tir" et les ondes réfléchies sont captées par des hydrophones habituellement disposés dans la ligne de tir. En sismique marine, les hydrophones sont enchâssés dans un câble étanche spécialement conçu à cet effet, la flûte, qui peut être tiré dans l'eau par un bateau. La flûte, qui est maintenue à la profondeur voulue par des appareils spéciaux (Depth controller, Depressor), peut avoir entre 1 500 et 2 750 mètres de longueur. L'enregistrement s'effectue en route, car il ne serait pas possible d'arrêter tout l'appareil à chaque tir. Les hydrophones sont espacés par groupes et chaque flûte peut comporter vingt-quatre, quarante-huit ou quatre-vingt-seize groupes (Figure 47).

Entre des enregistrements, on déplace le câble de façon à ce que les groupes se relaient à telle ou telle position. Le but de cette manoeuvre est de pouvoir, lors du traitement informatique des données, additionner les enregistrements produits par plusieurs couples de détecteurs qui ont une séparation différente mais le même point-réflecteur (profondeur commune). Cette technique de juxtaposition ou d'addition, appelée "stacking" en anglais, est un moyen très efficace d'améliorer le rapport signal-bruit des enregistrements. L'énergie ainsi additionnée est affichée sous forme de trace d'enregistrement qui consiste essentiellement en une courbe amplitude-temps produite par un oscillographe. De cette façon, l'énergie émise par tous les tirs à

mesure que la flûte se déplace est représentée par une succession de traces ondulées sur une échelle de temps, ce qui donne une "section" d'enregistrement pour toute la ligne de tirs. Cet enregistrement est en quelque sorte une coupe chronologique à travers une section géologique et c'est pourquoi il est souvent appelé "profil".

Afin que cette information soit utile, il faut connaître à chaque instant la position et la vitesse exactes de la flûte, de manière à ce que la section d'enregistrement et tous ses points de tir puissent être reportés sur une carte. Avant d'obtenir un imprimé définitif, il faut soumettre les données à de nombreux traitements afin d'améliorer l'apparence de la section et d'en faciliter l'interprétation. Ainsi, on emploie de nombreux filtres, on applique des fonctions d'amplification du signal, on utilise des programmes de migration (conversion des temps en profondeurs) afin de déplacer les réflecteurs en fonction de la position spatiale des réflecteurs et on a recours à un ou plusieurs des traitements suivants: "Designature", "Demultiple", atténuations de divers genres, déconvolution avant ou après addition, anti-résonance, "depegleg" et aplatissement, pour n'en nommer que quelques-uns.

L'interprétation des résultats consiste à porter les temps ou les profondeurs calculées sur une carte et à en déduire les traits des formations géologiques d'intérêt. On étudie les profils pour relever les caractéristiques des réflexions qui peuvent renseigner sur l'épaisseur des lits, les changements de faciès, les variations de densité et de porosité et le degré d'inclinaison. L'étude des profils permet également d'isoler les signaux indésirables qui brouillent le sismogramme: balayage latéral, réflexions multiples, bruits fantômes, sources ponctuelles, anomalies d'amplitude, diffractions et ondes réfléchies par des surfaces hors-plan. Si la section est soumise à un contrôle rigoureux, l'interprétation sera facile à exécuter; sinon, la tâche peut être très ardue, et les réponses ambiguës.

Les hydrophones utilisés en sismique-réflexion marine sont des appareils sensibles à la pression, contrairement aux détecteurs employés sur la terre ferme dans les levés par réflexion ou par réfraction, qui, eux, sont sensibles à la vitesse. A l'intérieur des flûtes, les hydrophones sont groupés en sections actives, séparées par des sections inactives. La flûte est remorquée par un bateau spécialement conçu à cette fin. La position du navire, des sources sismiques et de la flûte les uns par rapport aux autres est connue avec précision et est utilisée par les systèmes de navigation et de positionnement à bord du navire. En prospection marine, on emploie plusieurs types de source sismique: canons à air, batteries de canons à air, canons à vapeur, canons à eau, appareils électriques à séparation de plaques, appareils à décharge électrique et appareils à compression; on n'utilise plus d'explosifs, sauf dans des circonstances exceptionnelles. Chacune de ces sources produit dans l'eau une forte impulsion qui a des caractéristiques distinctes. Voici quelques-unes de leurs dénominations:

SOURCES			
A GRANDE PUISSANCE		A FAIBLE PUISSANCE	
Canon à vapeur:	Vaporchoc	Appareils à arcs électriques (étinceleur):	Wassp, Acer
Canon à air:	Bolt, Pnu-Con	Sleeve Exploder:	Aquapulse
Canon à eau:		Imploseurs:	Boomer, Flexichoc
Charge enfermée:	Flexotir		Hydrosein
Canon à gaz:	Gas Exploder	Cordeaux détonants:	Aquaseis

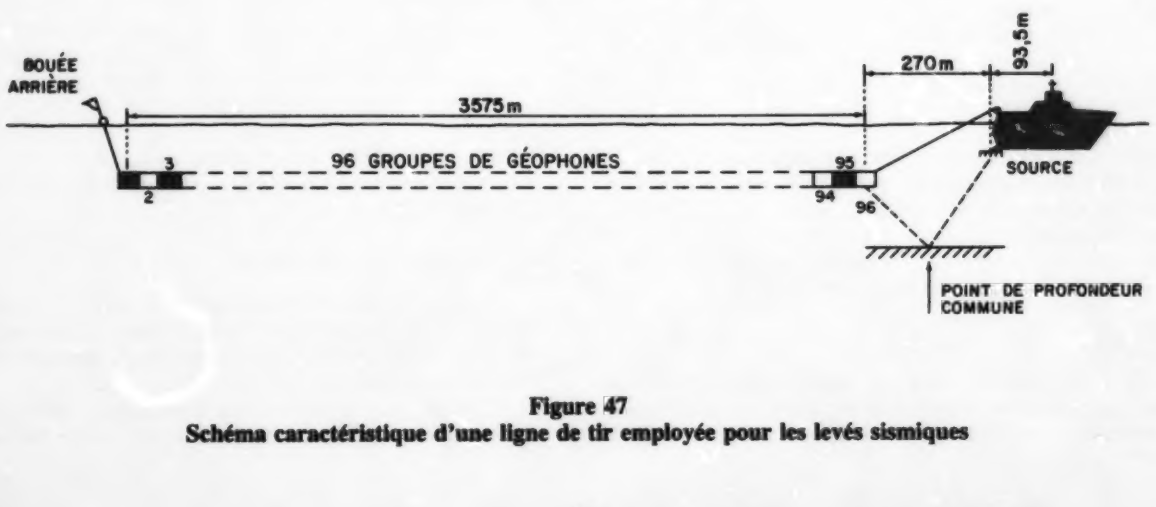


Figure 47
Schéma caractéristique d'une ligne de tir employée pour les levés sismiques

La navigation du navire et le positionnement de la flûte marine et des points de tir exigent que les données sismiques soient intégrées à des données produites par un ou plusieurs des systèmes de localisation suivants: Argo, Syledis, Decca, radar-doppler, sonar-doppler, Lambda, Lorac, Loran, Omega, Raydist, Shoran, Toran et d'autres (voir Chapitre 7). Certains dispositifs spécialisés combinent plusieurs de ces systèmes sous diverses dénominations commerciales. Bien que la précision ne soit parfaite dans aucun des cas, elle est généralement suffisante compte tenu des sources d'erreur inhérentes à la méthode de prospection et au traitement et à l'interprétation des données. Néanmoins, elle s'améliore constamment.

Profileur de sous-sol marin, sonar latéral, etc.

Une fois que les profils de sismique-réflexion 2D ont été interprétés, et le lieu de forage choisi, on passe au groupe de travaux géophysiques suivants. Ceux-ci ont pour but d'établir des cartes bathymétriques détaillées de l'emplacement du puits, de déterminer la nature de la topographie des fonds marins et de l'interface eau-sédiments, de déterminer les propriétés des sédiments en deçà de 50 mètres de profondeur et de définir le risque géologique (par ex. zones de haute pression, zones de pergélisol, gaz naturel gelé) dans les six cents permiers mètres de sédiments du sous-sol marin. On veut ainsi s'assurer que l'emplacement pourra être occupé avec efficacité et en toute sécurité. On établit un réseau de lignes d'échosondage et de profilage espacées d'un quart de kilomètre à un demi-kilomètre sur une superficie de deux kilomètres carrés, que l'on met ensuite en relation avec des photographies et des échantillons de fonds marins. Il est important de bien déterminer les positions au moyen de systèmes de localisation précis et fidèles. Les tableaux IX et X indiquent les types de système géophysique utilisés et en donnent les caractéristiques.

Même si, dans l'ensemble, le matériel de sondage du sous-sol marin est analogue au matériel utilisé en sismique-réflexion à grande profondeur, ses différences sont suffisamment importantes pour que nous nous y attardions.

Les appareils de cette catégorie servent à rechercher des niches d'arrachement, des failles, des zones de gaz, des pièges peu profonds, des zones de pergélisol, et ainsi de suite.

Les systèmes à haute résolution utilisent des sources sismiques qui produisent des impulsions brèves, puissantes et uniformes qui couvrent un large spectre de fréquences. Les appareils enregistreurs doivent avoir des taux d'échantillonnage et de gain élevés. Les flûtes marines doivent être très sensibles. Plusieurs sources sismiques sont utilisées.

Boomer

Il s'agit d'une source sonore électromécanique, dans laquelle une bobine électrique est couplée magnétiquement à une plaque. Des condensateurs sont déchargés dans la bobine, créant des courants d'induction qui exercent une force contre une membrane de caoutchouc. Grâce à un couplage mécanique, on élimine les impulsions de cavitation.

Étinceleur

Le remorquage de la source et des hydrophones obéit aux mêmes règles que pour le boomer mais, dans ce cas-ci, l'impulsion acoustique est produite électriquement par plusieurs arcs électriques sous-marins qui se déchargent simultanément. La période de l'impulsion acoustique est essentiellement proportionnelle au nombre de joules d'énergie déchargés par électrode. Un hydrophone à haute résolution et à trace simple enregistre les échos sismiques sur un sismogramme.

Canon à air

Un canon à air est une source omnidirectionnelle dans laquelle de l'air sous haute pression est poussée soudainement et violemment dans une chambre qui peut avoir diverses dimensions. Cette source produit une impulsion secondaire appelée "effet bulle". Pour obtenir une résolution optimale, il faut utiliser la plus petite chambre de détonation qui permette à l'impulsion de pénétrer le plus profondément possible dans le sous-sol marin. En faisant varier le volume de la chambre de détonation, la pression de l'air et la profondeur de remorquage, on obtient divers spectres d'énergie et diverses signatures.

Flexichoc, Sleeve exploder et batteries de canons à air

Complémentaire des méthodes décrites ci-dessus, la technique Flexichoc crée des implosions en provoquant des oscillations haute pression, par voie hydraulique, dans une membrane de caoutchouc située entre des plaques. On obtient ainsi un large spectre de fréquences et une haute résolution. Utilisée de pair avec des hydrophones multicanaux, cette source émet dans toutes les directions sans produire d'effet bulle. Le "Sleeve exploder" est constitué de deux flotteurs qui supportent un certain nombre de manchons élastiques séparés les uns des autres. Une valve solénoïde commande le débit de l'oxygène et du propane qui sont déchargés par un appareil de commande des tirs. L'expansion rapide du manchon transmet une onde de compression ayant une signature et une amplitude distinctives. On peut aussi utiliser des batteries de canons à air équipées de chambres de diverses dimensions et sous diverses pressions, afin d'obtenir plusieurs spectres de fréquence et signatures.

Sonar latéral

Cet appareil sert à étudier les irrégularités des fonds marins, telles que zones d'érosion glaciaire, éboulis, affleurements rocheux et blocs. Un "fish" est remorqué à une distance des fonds marins qui varie de 15 à 150 mètres selon la résolution désirée, et des impulsions d'énergie sonar d'environ 120 kKz sont engendrées par une batterie d'éléments. L'affichage des temps de réflexion et de l'amplitude des ondes réfléchies par les objets des fonds marins donne une représentation graphique de la position et de l'attitude de ces objets (Figure 48).

Finalement, le profileur de sous-sol marin se distingue de la sismique-réflexion 2D à grande profondeur par une pénétration beaucoup moindre, mais chacune de ces techniques présente des caractéristiques qui limitent les possibilités d'analyse et d'interprétation.

Levés par sismique-réflexion 3D

On peut dire du levé à trois dimensions qu'il est constitué d'un réseau dense de lignes parallèles 2D, sauf que, dans ce type de sondage, chaque opération devient extrêmement complexe, diversifiée et fastidieuse.

La saisie de données à trois dimensions a débuté par l'emploi de dispositifs en croix. On a ensuite adopté des tech-

TABLEAU IX

Tableau synoptique des instruments utilisés en bathymétrie et en prospection de la proche-surface (± 50 mètres) et des informations obtenues

	Objectif	Buts	
Sonar latéral	Cartographie topographique des fonds marins	Identification de zones érodées par des icebergs, d'ondes de sable, de vestiges, d'obstacles et de risques engendrés par l'Homme.	L'effet cumulé de la forme du faisceau haute fréquence et de la brièveté de l'impulsion acoustique permet au système de reconnaître les détails de micro-formes et macro-formes des fonds marins d'après la force de l'écho. La distance, la profondeur de remorquage, l'angle du faisceau et l'angle de dépression doivent être réglés à des valeurs optimales. La géométrie du "fish" est une considération importante et des corrections scalaires doivent être apportées pour assurer un positionnement précis. La technique du sonar latéral est essentiellement analogue à l'échosondage, sauf que le faisceau vertical est étroit et que le signal se propage perpendiculairement à la trajectoire du navire.
Échosondeur	Bathymétrie détaillée, topographie et morphologie	Profilage et cartographie topographiques à haute résolution.	La mesure précise des profondeurs est l'information la plus précieuse qu'un levé puisse fournir. Les enregistrements de l'échosondeur sont rassemblés et des courbes de niveau établies. La précision dépend en grande partie de la conversion des vitesses, des corrections de marée et de l'étalonnage de l'instrument. Des vérifications doivent être faites par comparaison avec des micro-profils enregistrés ou avec des mesures indépendantes de la profondeur. Une erreur de vitesse de 2 mètres/seconde peut fausser la mesure des profondeurs de 1,3 %.
Profileur de sous-sol marin	Cartographie de la proche-surface (± 50 mètres) à haute résolution	Identification des sédiments et des structures des fonds marins; stratigraphie et types de sédiments; argile à blocaux, matériau de remplissage des chenaux, éboulements, failles.	On utilise des sources acoustiques telles que transducteurs, boomers, étinceleurs et canons à air pour produire des impulsions sur un large spectre de fréquences et ainsi obtenir des profils de sismique-réflexion continus et à haute résolution, à faible profondeur. Pour obtenir une pénétration et une résolution optimales à la fois dans les sédiments durs et tendres, il faut faire un compromis entre la source sismique, la durée de l'impulsion et le spectre de fréquences. Le boomer tiré sur les fonds marins (300 Hz – 12 kHz) donne une meilleure résolution, mais un étinceleur multi-électrodes (50 Hz – 3 kHz) a accès à des profondeurs plus grandes tout en conservant un bon pouvoir séparateur. L'énergie produite par les étinceleurs offre un spectre de fréquences beaucoup plus large que celui émanant de d'autres sources et la fréquence de l'énergie maximum relative est généralement supérieure à celle produite par les canons à air.

TABLEAU X

Dispositifs de prospection géophysique en mer

Caractéristiques	Sonar latéral	Échosondeur	Profileur de sous-sol marin	Boomer	Étinceleur	Canon à air	Flexichoc, Sleeve Exploder et batterie de canons à air
Source, gamme de fréquences utilisable	20-500 kHz	40-400 kHz	400 Hz-14 kHz	300-12 000 Hz	50-3 000 Hz	20-1 000 Hz	50-1 000 Hz
Énergie produite (estimation)	50 Joules	150-500 Joules	100-10 000 Joules	100-3 000 Joules	230-30 000 Joules	350-30 000 Joules	± 20 000 Joules
Durée de l'impulsion	150 ms	0,15-8 ms	2-30 ms	0,5-4 ms	1-10 ms	1-10 ms	± 3 ms
Fréquence de répétition	Varie selon la distance	16-20 par seconde	0,2-6 par seconde	1/64-8 sec.	0,25-2 impulsions par seconde	Varie selon la charge	Varie selon la vitesse de chargement
Résolution	60 cm	5 cm	0,1 m	0,5 m	1-25 m	1-25 m	7-20 m
Pénétration	0	0-0,1 m	10-60 m	25-75 m	100-500 m	100-500 m	1-600 m
Largeur du faisceau	± 1-2° vert. ± 28° ou 55° hor.	Conique ± 8°	Conique ± 36°	Faisceau omnidirectionnel			
Usages	- répartition des sédiments et de la roche en place en surface - repérage d'affleurements et d'objets submergés - identification d'obstacles - cartographie topographique - morphologie des fonds marins	- profilage topographique à haute résolution - bathymétrie - morphologie des fonds marins	- cartographie de la stratigraphie du sous-sol - profondeur de l'érosion glaciaire, agrégats de remplissage des chenaux et cartographie des alluvions	- cartographie géologique: sédimentologique, stratigraphique, lithologique et structurale - analyse de l'emplacement des puits - recherche d'alluvions et d'agrégats d'emprunt - propriétés, abondance et cartographie de l'érosion glaciaire - délimitation détaillée de structures, de risques et de zones de gaz à des profondeurs plus ou moins grandes du sous-sol - cartographie des structures et sédiments littoraux peu profonds du sous-sol marin, y compris les zones de pergélisol - information quantitative sur les propriétés élastiques, la vitesse des couches, etc. - cartographie de la roche en place et des zones de failles			

niques par lignes multiples et par tirs multiples afin de donner aux ondes réfléchies des trajectoires permettant de mieux définir l'objet étudié. Les méthodes actuellement en usage remontent à 1974. Sur un grand nombre de lignes parallèles espacées de 20 à 75 mètres, on procède à des tirs tous les 25 mètres. Comme dans le cas des levés 2D, les flûtes marines ont une longueur de l'ordre de 2 500 mètres et contiennent 48 ou 96 groupes d'hydrophones (Figure 47). On peut installer des compas dans le câble afin de faciliter le positionnement des groupes en même temps que la navigation, évitant ainsi les erreurs de position dues à la dérive du câble. On planifie la trajectoire du navire de manière à pouvoir exécuter en fin de ligne de larges virages qui permettent à la flûte de se déplacer en ligne droite et d'être positionnée plus facilement à l'intérieur de la bande étroite qui sépare les lignes de levé.

Les sources sismiques les plus fréquemment utilisées dans ce type de levé sont le Vaporchoc, le canon à air et les batteries de canons à air.

Il est essentiel que la position de chaque source sismique et de chaque groupe d'hydrophones soit connue avec précision à chaque tir. À cette fin, on emploie les systèmes MiniRanger, Syledis, Argo, GeoNav, Transit et Navstar. L'éloignement de la terre ferme peut poser de sérieux problèmes de positionnement dans des levés en trois dimensions.

Mais ce n'est que lorsque les données recueillies au cours du levé ont été convenablement rassemblées dans la mémoire de l'ordinateur que les coordonnées x-y relativement exactes de tous les groupes, tirs et points de profondeur commune ont été mémorisées, que l'on commence vraiment à exploiter les possibilités nouvelles de la technique 3D. Il y a trois méthodes fondamentales que l'on peut utiliser.

a) Il est possible de choisir, dans l'espace tridimensionnel, un certain nombre de profils à afficher et à interpréter (Figure 49). Il peut s'agir de profils à deux dimensions dans la direction des lignes originales. Il peut s'agir de

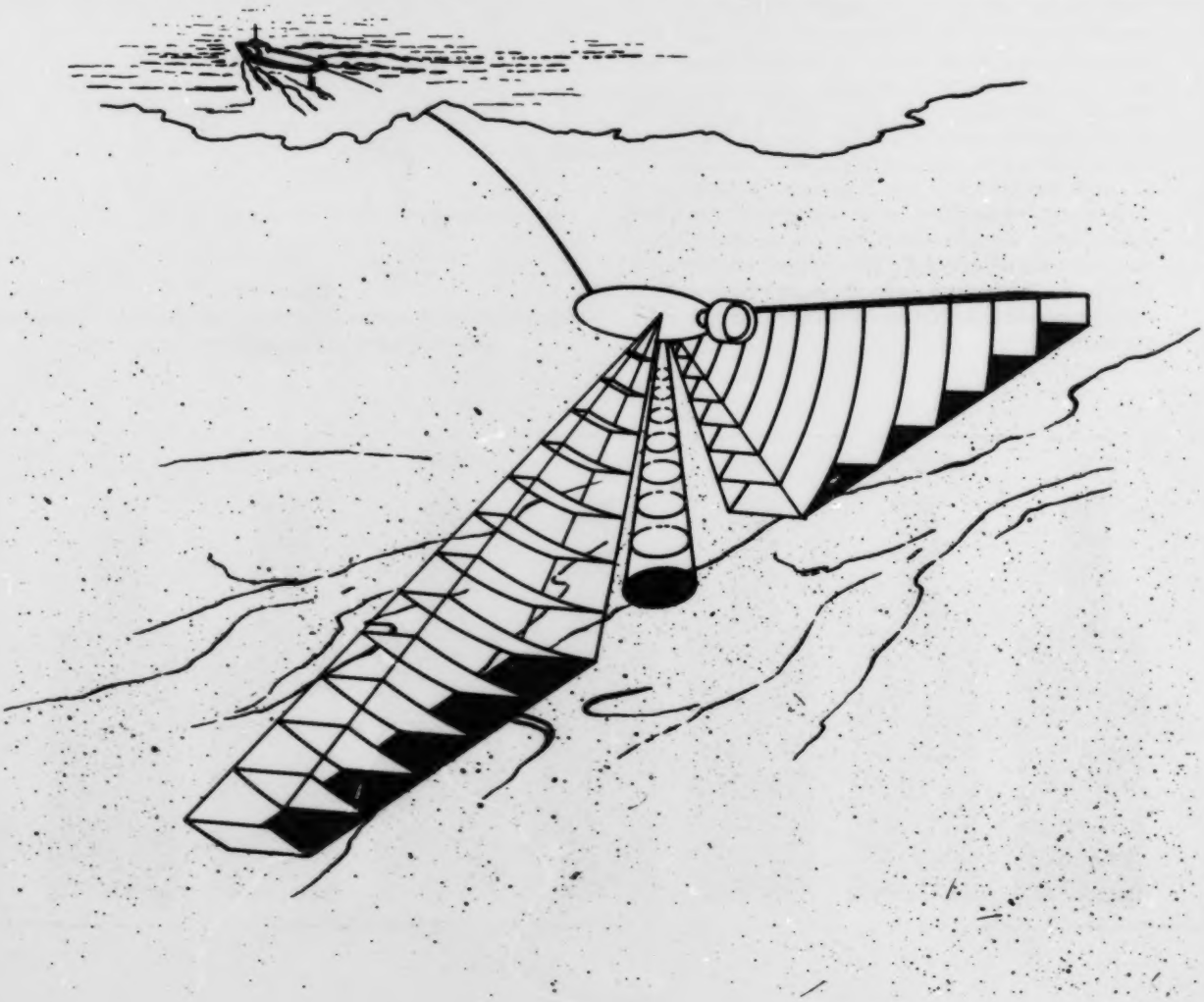


Figure 48
Navire hydrographique, câble de remorquage, fish et organes de détection du sonar latéral

profils à deux dimensions perpendiculaires à ces lignes. Mais surtout, il peut s'agir de profils à deux dimensions choisis dans n'importe quelle direction. Tous ces profils peuvent être rappelés en tout temps.

b) Ces données peuvent aussi être représentées sous une forme nouvelle et révolutionnaire: on est maintenant capable de porter sur une carte ou un plan la variation de l'amplitude des traces, quel que soit le temps ou la position des enregistrements. En effet, en étudiant une succession de traces produites à des intervalles choisis, on obtient un graphique de la variation de la forme horizontale des réflexions dans les couches qui a l'aspect d'une carte à trois dimensions. On peut produire autant de cartes qu'on le désire, peu importe l'intervalle retenu (Figures 50 et 51).

c) La technique 3D présente un autre avantage très important. En effet, les levés par sismique-réflexion 2D à grande profondeur contiennent toujours une ambiguïté fondamentale lorsque les formations réfléchissantes présentent une inclinaison. Il n'est pas possible de déterminer avec précision d'où proviennent les ondes réfléchies lorsqu'on interprète des profils ordinaires à deux dimensions, à moins d'une forte densité de réflexions. La migration dans le temps ou avec la profondeur dans un espace à deux dimensions ne peut résoudre ce problème adéquatement. Or, grâce aux données à trois dimensions, le problème de la direction des pendages ne se pose pas et, par conséquent, il est possible de déterminer avec justesse la migration des ondes réfléchies. Cette technique permet donc de circonscrire le réservoir connu de façon précise et réduit considérablement le risque de forage d'un puits improductif.

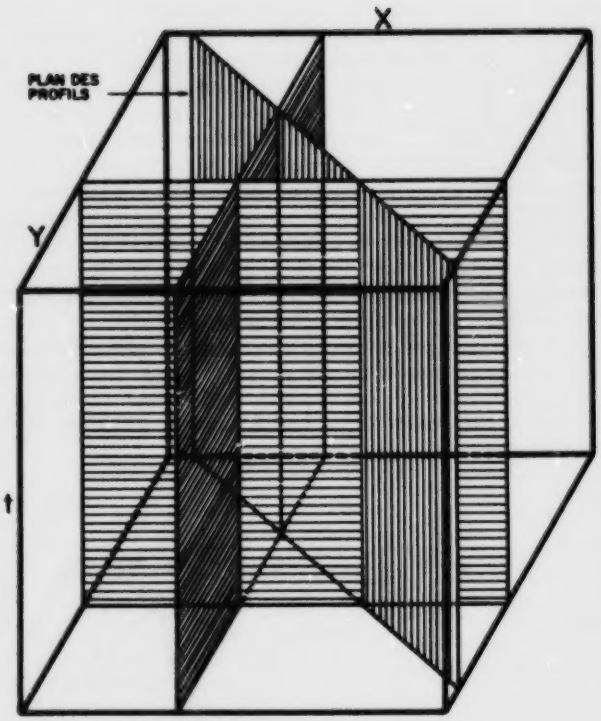


Figure 49
Espace tridimensionnel de données analogues aux données informatisées par sismique-réflexion 3-D

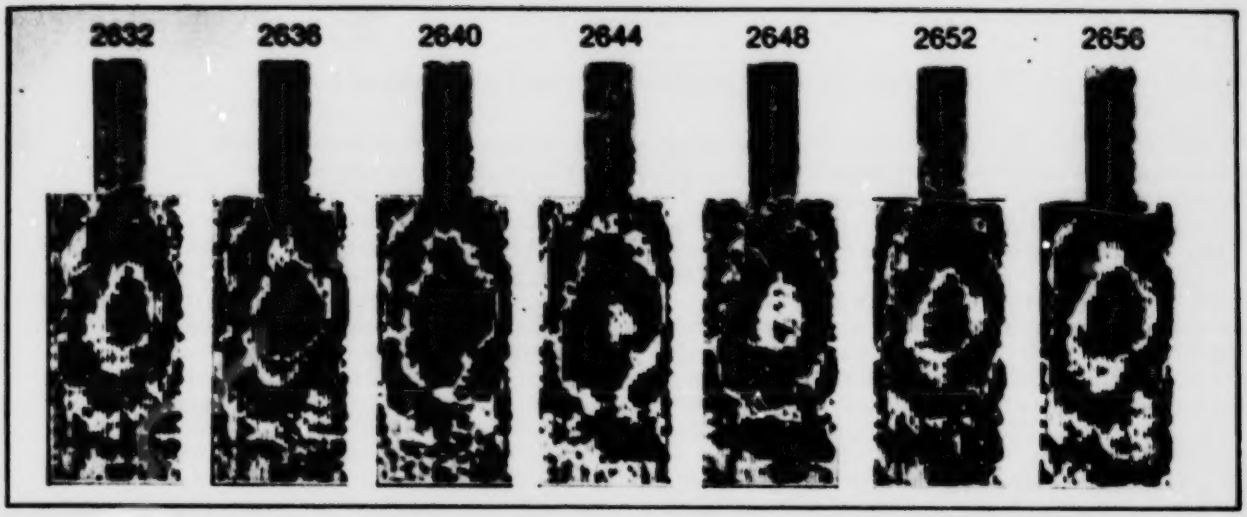


Figure 50
Sections isotemporelles caractéristiques, espacées à toutes les 4 msec, obtenues à partir des levés par sismique-réflexion 3-D

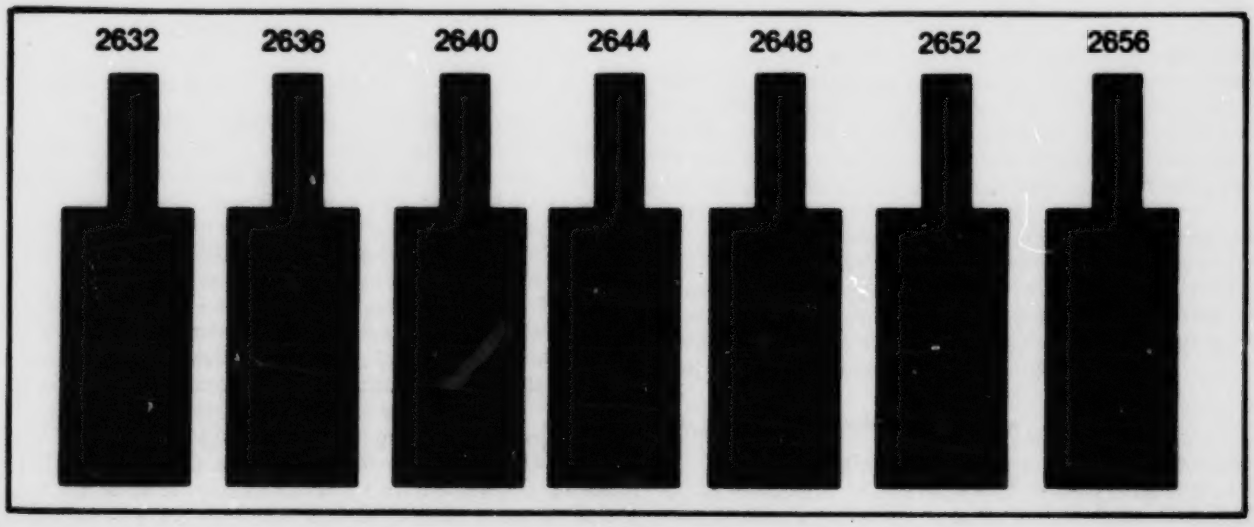


Figure 51
Courbes dessinées pour chaque section isotemporelle obtenues à partir des levés par sismique-réflexion 3-D

Chapitre 12

Les glaces de mer et les levés au large des côtes

La présence, l'absence ou le mouvement des glaces est un facteur primordial qu'il faut considérer au stade de la planification des opérations de levés au large des côtes de l'Arctique et de l'Est du Canada. Ces glaces entravent le déplacement des navires hydrographiques, rendent impossible l'installation en permanence de plates-formes sur le fond marin et rendent extrêmement dangereuse l'installation de pipelines et de tout autre équipement sur le fond marin que peuvent affouiller des icebergs. De plus, les glaces limitent la portée et réduisent la précision de certains instruments électromagnétiques de distance (Voir Chapitre 7).

La classification des glaces que l'on rencontre habituellement dans les eaux bordant le littoral canadien oriental est, conformément à la terminologie admise internationalement (Nomenclature des glaces de mer de l'Organisation météorologique mondiale), basée principalement sur les deux définitions qui suivent:

> *Glace de mer*, toute formation de glace rencontrée dans la mer et qui est causée par le gel de l'eau de mer.
>
> *Glace de terre* (glace de glacier) sont les glaces qui proviennent de la terre ferme ou d'une plaque de glace rencontrées dans l'eau ou échouées.

Le Service de l'environnement atmosphérique, ministère de l'Environnement, publie le *MANICE*, manuel complet concernant les termes de glace, les catégories de glace, les normes relatives aux codes dans les rapports de glaces et les procédures et pratiques dans les reconnaissances de glaces employés au Canada.

En général, la rigidité et la dureté de la glace de mer croissent avec l'âge, en raison de la réduction graduelle des cellules d'eau salée dans la glace.

Les glaces dans la baie d'Hudson

Du fait de sa latitude et de sa situation à l'intérieur des terres, la baie d'Hudson est couverte de glace plus longtemps que si elle était en eaux libres. Le gel est un processus lent, à cause de la grande superficie de la baie, mais les glaces sont abondantes du début de novembre à la mi-juillet et ses eaux ne sont libres que de la mi-août à la mi-octobre.

Dans la baie, la glace commence à se former dans les bras de mer de la côte Nord-Ouest, habituellement vers la fin d'octobre, mais en certaines saisons, elle se forme simultanément dans les eaux froides du chenal Foxe, dans la partie Nord-Est. A mesure que la température baisse la glace s'étend vers le Sud, le long du rivage, plus rapidement que vers la mer.

Au cours de l'hiver et dans la plupart des secteurs, une ceinture de glace côtière de 5 à 10 milles se forme, et il n'est pas rare que toute la zone au Sud et à l'Est des îles Belcher soit couverte de glace fixée. L'épaisseur de cette glace, de 75 à 90 cm le 1er janvier, atteint 150 à 180 cm le 1er mai.

En plus de la glace fixée, la baie est presque complètement envahie par la banquise dérivant sous l'action du vent. Avec les températures au-dessous de zéro des mois de janvier, février et mars, la glace se reformera rapidement et ne sera disloquée que par les mouvements des autres glaces. Il se formera ainsi une banquise variable composée de nouvelle glace, jeune glace et glace de l'année sous la forme de crêtes et d'entassements en certaines zones, et d'une plus grande épaisseur dans les zones du Sud, par suite de la prédominance des vents du Nord-Ouest au Sud-Ouest.

A mesure que les températures s'élèvent en mai et juin, la glace déplacée par le vent ne se reforme plus. Le processus normal du dégagement est le recul de la banquise vers le Sud, de la zone de l'inlet Chesterfield — île Southampton, et vers l'Ouest, de la côte du Québec bordant la baie, durant la première quinzaine de juillet.

En août, la zone couverte de glace continue de s'étrécir et la banquise se morcelle en quelques grands pâtés avant de fondre complètement au cours de la seconde quinzaine du mois. A partir de la fin d'août jusqu'au gel, la pénétration des glaces en provenance du bassin Foxe peuvent envahir la zone NE.

Les glaces dans le détroit d'Hudson

La glace, dans le détroit d'Hudson, est surtout d'origine locale, mais les vents et les courants charrient parfois dans la zone des floes en provenance du bassin et du chenal Foxe, ou de la baie Baffin et du détroit de Davis. La glace du bassin Foxe est presque exclusivement de la glace de l'année ou de la jeune glace, reconnaissable à sa grande rugosité et à son manque de coloration. La glace de la baie de Baffin peut comprendre de nombreux vieux floes si l'été précédent a été frais dans la baie Baffin, mais la glace de l'année est la plus commune.

Le gel de cette zone commence habituellement vers la fin d'octobre et se poursuit dans le détroit, vers l'Est, que la glace couvre entièrement à la fin de novembre. L'épaisseur de la glace croît, de 60 à 75 cm au 1er janvier, de 1,5 à 1,6 m à la mi-mai.

Dans les zones du large, les forts courants de marée et les coups de vent fréquents maintiennent la glace en mouvement durant l'hiver. Des chenaux s'ouvrent et se ferment; l'épaisseur des floes s'accroît de celle de la nouvelle glace et de celle de l'année, et naturellement, il se forme constamment des crêtes, des chevauchements et des entassements. Il existe habituellement un chenal de brèche le long de la côte de Baffin.

En mai, les chenaux persistent plus longtemps, à mesure que les températures s'élèvent et que le regel devient moins fréquent. Le dégagement complet de la glace de mer se produit habituellement à la mi-août, et durant le reste de la saison de navigation les seuls dangers éventuels sont les icebergs et les pénétrations de glaces en provenance du bassin Foxe.

Les glaces sur la côte du Labrador

Dans cette région, les glaces sont, en partie, de formation locale, et en partie en provenance du détroit d'Hudson et de la zone du détroit de Davis – baie Baffin. Au danger de la banquise, s'ajoute celui de nombreux icebergs détachés de l'Ouest du Groenland. La glace locale appartient, naturellement, aux catégories glace nouvelle, jeune glace ou glace de l'année; il en est de même pour la glace du détroit d'Hudson, car les deux zones sont entièrement libres en été. D'autre part, la baie Baffin

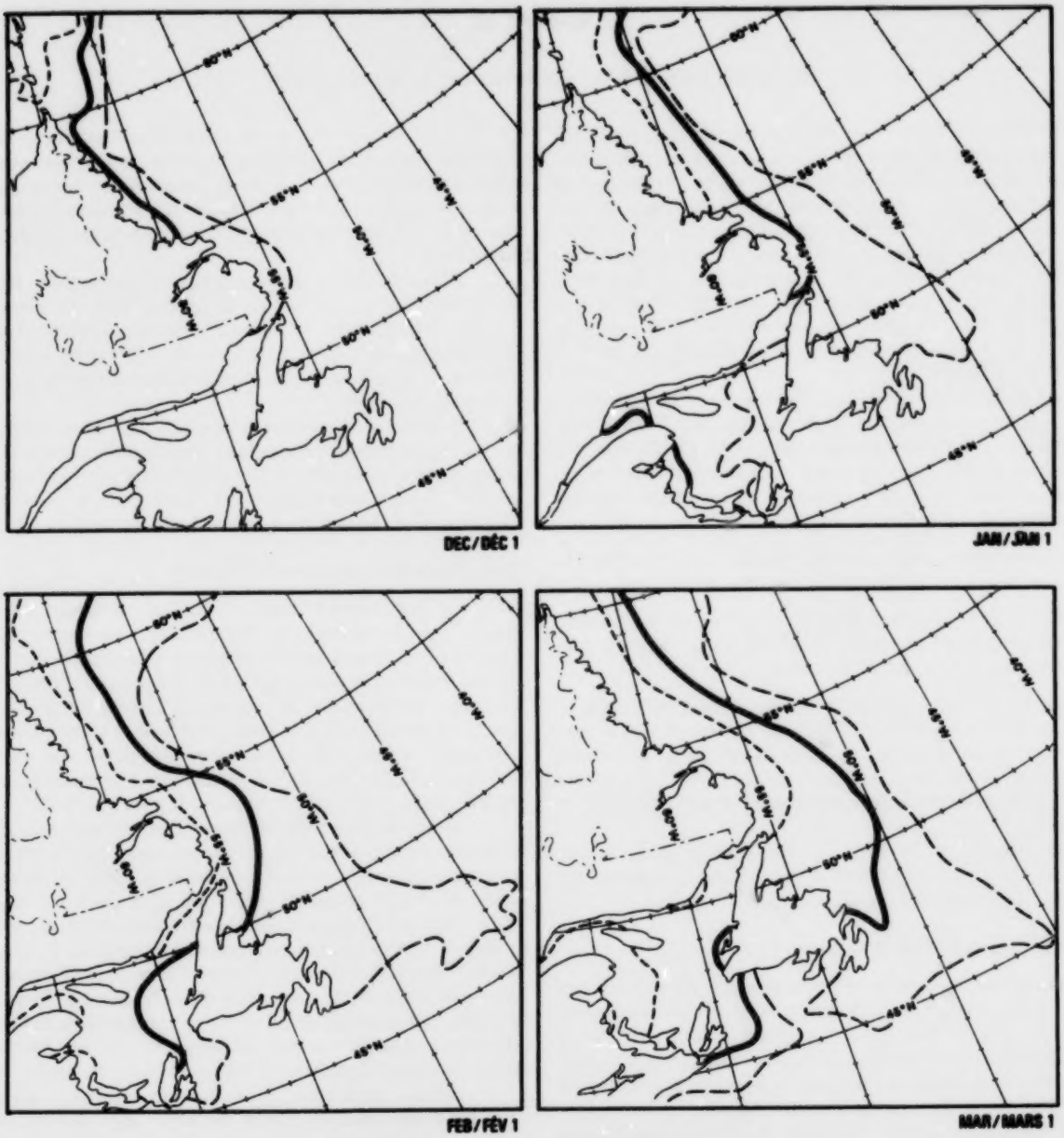


Figure 52a)
Étendue moyenne de la glace de mer le long des côtes du Labrador et de Terre-Neuve 1964-1979 (Décembre — mars)

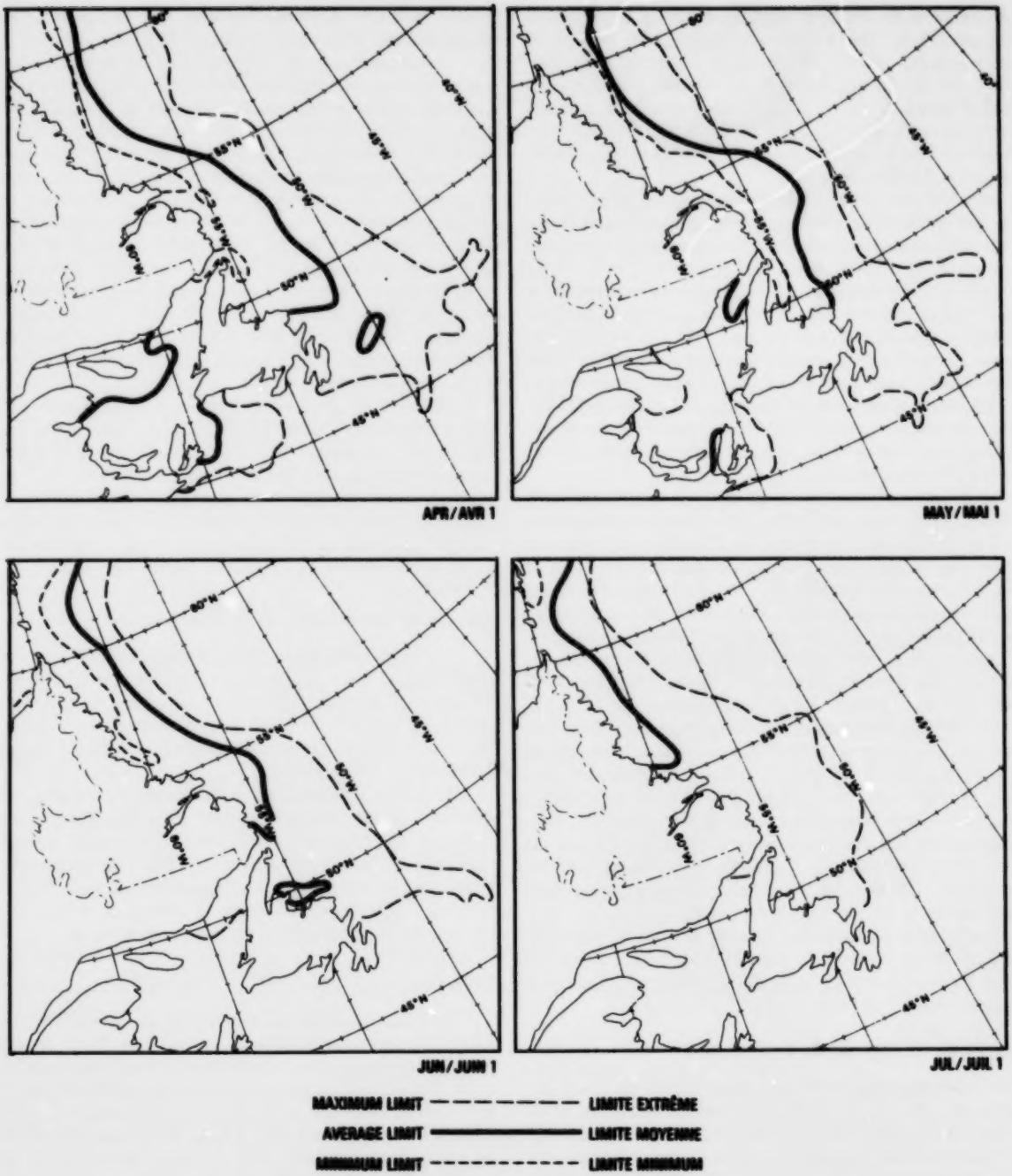


Figure 52b)
Étendue moyenne de la glace de mer le long des côtes du Labrador et de Terre-Neuve, 1964-1979 (Avril —juillet)

peut n'être pas complètement dégagée, et il peut en résulter la pénétration dans la zone du Labrador de glace de deux ou de plusieurs années, à la fin de l'hiver et durant le printemps, entraînée vers le Sud par les vents et courants. Cela n'est pas habituel et quand le cas se produit, les vieux floes sont très dispersés dans la banquise, mais il en résulte que l'on rencontre des floes anormalement durs, même dans les eaux du Labrador méridional et de Terre-Neuve.

Durant le mois de décembre, la banquise du large s'étend vers la mer et dérive vers le Sud sous l'action des vents et des courants. Des déplacements de 20 km par jour ne sont pas rares, mais la moyenne se situe probablement à 10 km.

La banquise côtière envahit les baies et bras de mer de la côte au cours de l'hiver, mais elle s'étend particulièrement du cap Harrison au Nord de Nain (latitude *57°N*). Les variations du vent peuvent ouvrir un chenal de brèche entre la banquise côtière et la banquise du large, bien qu'il puisse regeler ultérieurement; mais les températures modérées par rapport à celles de la baie d'Hudson se traduiront plutôt par une fermeture du chenal à la suite de changement de vent, que par un regel rapide dû aux basses températures de l'air.

Au cours de l'hiver, la banquise s'étend de plus en plus pour atteindre une largeur de 200 à 300 km avant le début de la fonte. Il est évident que l'épaisseur de la banquise ne résulte pas seulement des températures locales, puisque la dérive vers le Sud sous l'action des vents et des courants peut entraîner les glaces en provenance du détroit de Davis jusqu'au Sud de la baie Groswater, en février, et l'on trouve des épaisseurs de 1,5 m.

Dans les eaux méridionales du Labrador, la fonte débute dans la dernière semaine d'avril; à la fin mai dans celles du Labrador central, et à la mi-juin à l'île Resolution. Sur la côte du Labrador, le dégagement de la banquise est graduel et lié à la progression de la fonte vers le Nord. La banquise devient de plus en plus étroite et peut se diviser en larges pâtés; sa concentration diminue naturellement avec la fonte complète de toute glace, jeune ou nouvelle. A la mi-juin, sa lisière Sud a libéré Belle-Isle; dans la première semaine de juillet, la banquise s'est retirée au Nord de l'inlet Hamilton, et à la fin du mois elle est dans les parages du cap Chidley, où quelques zones de glace peuvent persister durant la première semaine d'août.

Pour le reste de la saison, les eaux libres sont prédominantes jusqu'au gel d'automne. L'étendue de la glace de mer au large des côtes du Labrador et de Terre-Neuve de décembre à juillet est illustrée à la Figure 52.

Les glaces sur la côte est de Terre-Neuve

On rencontre dans cette zone deux formes de glace: les dangereux et pittoresques icebergs, d'origine arctique, et la glace commune de mer (mer congelée) dont l'effet est beaucoup plus important sur la navigation. La glace de mer se forme dans les eaux littorales, de l'île Fogo et vers le Nord, et est charriée le long de la côte par le vent et le courant. Elle contourne parfois Race, mais elle dérive le plus souvent vers le Sud ou le SE, sur la partie Nord des Bancs de Terre-Neuve.

La formation de la glace de mer débute sur la côte méridionale du Labrador à la mi-décembre, puis s'étend dans les eaux du Sud de Terre-Neuve au début de janvier. Elle s'étend graduellement ensuite au large et vers le Sud, pour atteindre la baie Notre-Dame et l'île Fogo, à la fin de janvier. Au cours de la plupart des années, le pack dérive au large et au SE du cap Freels, et la côte de Terre-Neuve au Sud du cap Bonavista ne reçoit que des floes isolés et durant de brèves périodes.

La glace de mer qui se forme au début de l'hiver dans les eaux septentrionales de Terre-Neuve et les eaux méridionales du Labrador atteint une épaisseur maximale de quelque 0,6 m au cours de l'hiver, et une grande partie est charriée vers le Sud par les vents et les courants, dans les eaux Est et SE du cap Bonavista. Les floes qui séjournent dans la baie White, par exemple, peuvent atteindre 1 m. De plus, il se produit une dérive vers le Sud de glaces en provenance du Labrador central qui complètent la masse de glaces à l'Est de Belle-Isle et ces floes peuvent atteindre une épaisseur de 1,2 m. Au printemps, cette source de glace peut même se trouver plus au Nord, jusqu'aussi loin que le détroit de Davis ou même la baie de Baffin. Du fait que cette dernière n'est pas dégagée complètement chaque été, quelques floes anciens peuvent apparaître dans les eaux de Belle-Isle et de Terre-Neuve en fin de saison.

Le recul des glaces survient à la fin mars, mais les changements sont lents au début. A la fin d'avril, la lisière Sud a reculé habituellement jusqu'à la baie Bonavista. En mai, le taux de fonte s'accroît et, au cours de la dernière semaine du mois, le pack se trouve généralement dans les eaux méridionales du Labrador. Ce recul libère de nombreux icebergs que le courant du Labrador charrie vers le Sud, et leur nombre dans les eaux de Terre-Neuve atteint un maximum à cette époque.

Les glaces sur la côte sud de Terre-Neuve

On considère que cette zone est habituellement libre de glaces toute l'année, car leurs pénétrations sont courtes et n'intéressent qu'une aire restreinte. Néanmoins, au cours des périodes de grand froid, elles peuvent atteindre les approches intérieures de la baie Placentia, la baie Fortune et les plus petites baies situées à l'Ouest.

Les glaces peuvent apparaître au large de la côte, comme conséquence du mouvement vers l'Est des glaces du golfe Saint-Laurent qui se sont manifestées aussi loin que Saint-Pierre et Miquelon. Les glaces à l'Est de Terre-Neuve peuvent contourner le cap Race et pénétrer, sous forme de pack lâche, aussi loin à l'Ouest que Saint-Pierre et Miquelon, mais ces deux incursions ne se produisent jamais simultanément.

Icebergs

La glace de mer, par son étendue et son épaisseur, constitue un danger pour la navigation; il est donc d'une importance vitale de déterminer les routes possibles et l'accessibilité des ports. Par ailleurs, la présence d'icebergs représente un danger grave isolé, mais elle ne s'oppose pas au passage des navires, comme le fait la glace de mer. Les icebergs rendent l'installation de plates-formes permanentes de forage impossible et gênent considérablement l'installation de plates-formes de forage pétrolier flottantes qui doivent être en mesure, à bref délai, de laisser un emplacement de forage avec la possibilité d'y retourner pour continuer le forage.

La plupart des icebergs rencontrés au large de la côte orientale du Canada proviennent de la baie de Baffin et la plus grande proportion se détachent des glaciers de l'Ouest du Groenland, en particulier de la région située entre l'île Disko (*latitude 70°N*) et la baie Melville (*76°N*). Ils sont charriés autour de la baie de Baffin dans le sens contraire des aiguilles

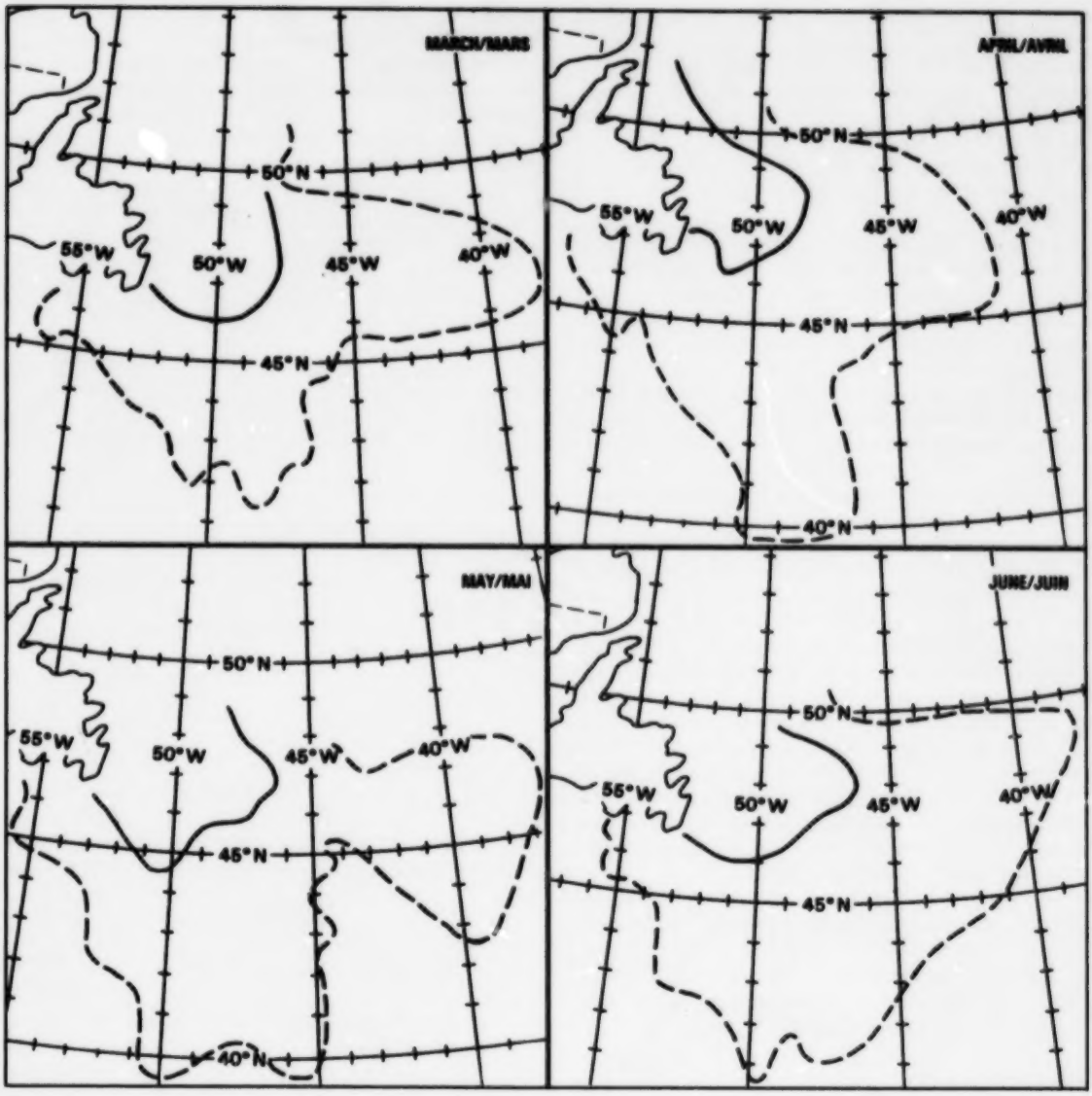


Figure 53
Limites extrêmes et moyennes des icebergs au large de la côte de Terre-Neuve, 1959-1975

d'une montre, puis sont entraînés ves le Sud, par le détroit de Davis, jusqu'à la côte du Labrador et les eaux de Terre-Neuve.

Les dimensions et les formes des icebergs, soit au-dessus ou en dessous de l'eau, varient considérablement. La patrouille internationale d'observation des glaces a signalé des hauteurs atteignant 80 m et des longueurs de 517 m mais la hauteur moyenne est de 30 m et le poids de quelque 204 000 tonnes. Le rapport hauteur/tirant d'eau d'un iceberg dépend largement de la forme de celui-ci.

Les icebergs flottent avec les sept huitièmes de leur masse au-dessous de l'eau, mais cela ne signifie pas que leur tirant d'eau est égal à 7 fois leur hauteur, car leur forme doit être prise en considération. Des mesures effectuées ont montré que le rapport moyen hauteur/tirant d'eau varie de 1:1 pour les icebergs du type «drydock», à 1:5 pour les icebergs à parois verticales.

On a signalé des icebergs au Sud de Terre-Neuve au cours de tous les mois de l'année, mais ils sont plus nombreux de septembre à janvier inclusivement.

On aperçoit habituellement les premiers icebergs sur le bord oriental des Bancs de Terre-Neuve à la fin de février ou au début de mars. Le Groenland libère chaque année de 10 000 à 20 000 icebergs, mais le nombre de ceux qui atteignent les eaux au Sud de la latitude *48°N* varie considérablement d'une année à l'autre. Peu d'icebergs dérivent au Sud de la latitude *40°N*, et ils ne descendent pas très loin, comme le montrent les cartes des limites mensuelles des icebergs (Voir Figure 53).

La dérive des icebergs est sous la dépendance des courants et des vents. Du fait que les sept huitièmes de sa masse sont immergés, un iceberg est soumis aux courants régnant entre la surface de l'eau et son tirant d'eau, et le courant résultant l'entraîne dans sa direction. Comme il est également soumis au vent, il s'ajoute un secteur de dérive, plus petit, qui tend à le déplacer sous le vent. La résultante finale de ces forces peut l'entraîner soit contre le vent, soit en travers du vent, ou encore, sous le vent ou à faibles angles de ce dernier.

Les navires équipés d'un radar en état de bon fonctionnement pourraient, dans des conditions favorables, détecter un iceberg à une distance suffisante pour éviter une collision; cependant, suivant l'état de la mer, il est possible qu'on ne puisse détecter des petits icebergs et des growlers d'une taille suffisante pour infliger des avaries à un navire.

Affouillement des glaces

La glace de mer, sous l'effet du vent, se déplace et forme des crêtes et des monticules de glace brisée. L'épaisseur de la glace augmente alors non seulement au-dessus de la surface de l'eau mais aussi en profondeur en dessous de l'eau. Le vent pousse aussi ces crêtes et lorsqu'elles frappent des hauts-fonds, alors la glace creuse des sillons sur le fond marin, souvent appelés affouillements. Il suffit, pour forer à partir de navires de forage dans la Mer de Beaufort où les affouillements sont en évidence, de draguer une excavation de quelques mètres de profondeur et de plusieurs mètres de longueur pour que l'équipement sous-marin soit en dessous du niveau du fond-marin.

Les icebergs qui descendent la côte Est du Canada produisent aussi des affouillements. Au large du Groenland, les icebergs ont causé des dommages aux câbles à des profondeurs de 230 mètres. Par conséquent on doit, à cette profondeur, prendre des précautions lors de l'installation de l'équipement sous-marin et lors du tamponnement des trous de forage. Une grande partie du plateau continental le long de la côte Est canadienne est sujette aux affouillements d'icebergs.

Règlements sur la navigation dans l'Arctique

L'épaisseur de la glace à différents endroits varie pendant l'année; la glace se déplace avec le vent et les marées pour former des chenals ou des crêtes et des monticules de glace brisée. La glace peut avoir différentes caractéristiques: la glace jeune ou la glace de l'année est facile à briser, alors que la glace de la deuxième année ou vieille de plusieurs années est plus dure. Par conséquent, les eaux de l'Arctique canadien au Nord de 60° N sont divisées en 16 zones de contrôle (Voir Figure 54). Le nombre de zones est le rang approximatif de l'importance de la glace. Le Décret sur les zones de contrôle de la sécurité de la navigation, le Règlement sur la prévention de la pollution des eaux arctiques par les navires et le Règlement sur la prévention de la pollution des eaux arctiques stipulent la catégorie des navires qui sont autorisés à entrer dans chaque zone pendant des périodes déterminées de l'année. La plupart des brise-glaces lourds peuvent entrer dans les eaux de l'Arctique canadien dès le 5 juin (zone 16) pour n'en sortir que vers le 31 janvier (zone 15); cependant, ils peuvent n'être dans la zone 1 que du 20 août au 15 septembre.

TABLEAU XI

Brise-glaces lourds et moyens d'enregistrement canadien
(extrait de Canadian Merchant Fleet 1981 Annual list)

	Tonneaux de jauge brute
Brise-glaces lourd	
CCGS Louis S. St. Laurent (Arctique Classe 4)	10908
CCGS John A. MacDonald	6186
CCGS John Franklin (Arctique Classe 3)	5910
CCGS Pierre Radisson (Arctique Classe 3)	5910
CCGS d'Iberville	5678
CCGS John Cabot	5234
CCGS Norman McLeod Rogers	4179
CCGS Labrador	3823
CANMAR Kigoriak (Arctique Classe 3)	3642
Brise-glaces moyen	
CCGS J.E. Bernier	2457
CCGS Griffon	2212
CCGS Sir William Alexander	2154
CCGS Camsell	2022
CCGS Montcalm	2017
CCGS Sir Humphrey Gilbert	1931

Brise-glaces

La Garde côtière canadienne a une flotte de brise-glaces de différentes dimensions pour entretenir les routes de navigation dans les régions du Sud du Canada pendant l'hiver et aussi pour entretenir les routes de navigation qui servent à réapprovisionner les agglomérations du Nord pendant les mois d'été. Les navires ont la responsabilité de voir à l'entretien des aides à la navigation et aussi d'entreprendre des opérations de recherches et sauvetage. Peu de navires sont destinés à un seul usage. Pour cette raison, Dome Petroleum a au début loué le John A. MacDonald, un navire de la GCC, pour ensuite faire construire le Canmar Kigoriak afin d'avoir un brise-glace destiné à leurs besoins dans la Mer de Beaufort.

La Garde côtière canadienne a conçu et a l'intention de construire un brise-glace de classe 8 (39,000 tonnes, pleine charge) pour l'Arctique. La mise en service d'un tel navire est prévu pour 1989 si l'approbation pour le construire est obtenue maintenant. Un tel navire pourrait être employé toute l'année dans les zones 2 à 16 (Figure 53) et dans la zone 1 du 1er juillet au 15 octobre.

En guise de comparaison, la Garde côtière des États-Unis a deux brise-glaces qui sont légèrement plus larges que le navire CCGS Louis S. St. Laurent, et 13 des 50 brise-glaces de la flotte de l'URSS sont plus larges que le CCGS Louis S. St. Laurent. Deux d'entre eux ont à peu près deux fois son tonnage et trois sont à propulsion nucléaire. Le tableau XI dresse une liste de plusieurs des brise-glaces lourds d'enregistrement canadien.

Plates-formes de forage des glaces

Environ douze puits ont été forés dans la région de l'île Melville depuis 1976 en fixant l'installation de forage sur la glace fixée. A cause de la masse de l'installation, on doit accroître l'épaisseur de la glace en la recouvrant de six à huit

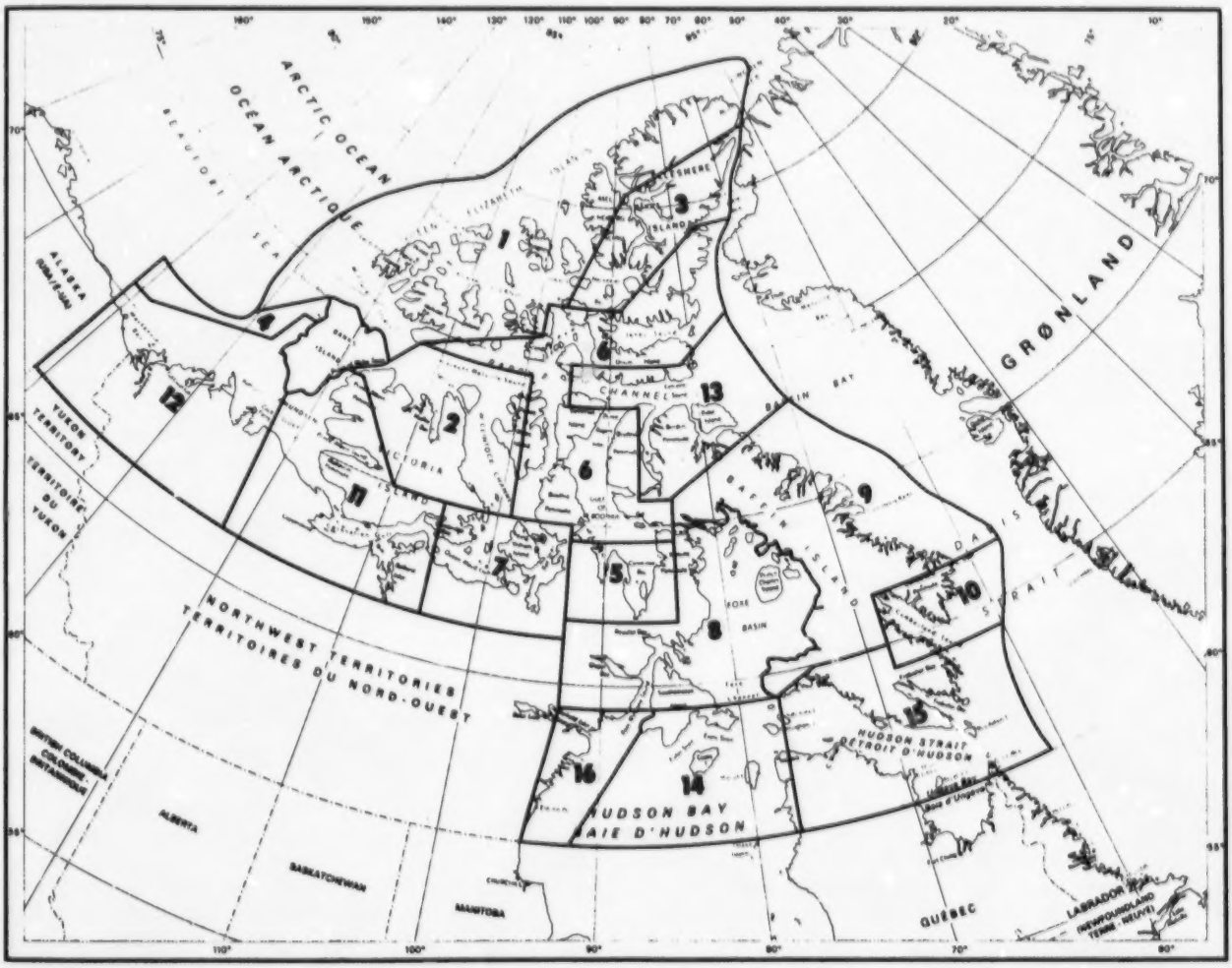


Figure 54
Zones de contrôle de la sécurité de la navigation des eaux de l'Arctique (au nord de 60°)

mètres d'eau pour obtenir une flottabilité suffisante. Une zone de plusieurs hectares est habituellement recouverte d'eau pour servir d'emplacement à l'installation et des zones d'épaisseur moindre pour les aménagements et le dépôt de carburant etc. Les travaux commencent habituellement au début de décembre et se terminent au début de juin.

Appendice A

Les levés en mer dans l'industrie pétrolière à l'extérieur de l'Amérique du Nord

par
Alan Haugh, Arpenteur en chef, British Petroleum Company, Londres, Angleterre

Réglementation des levés en mer

Si, dans beaucoup de pays du monde, la réglementation des levés est depuis longtemps un fait acquis dans le domaine cadastral, on a rarement jugé nécessaire de l'appliquer également au domaine marin, ni même à la zone littorale. En dehors de l'Amérique du Nord, il n'existe pas de levés dits "officiels" pour le milieu marin. Malgré l'ampleur considérable des travaux d'exploration et de construction en mer auxquels l'industrie pétrolière se livre de nos jours, rares sont les pays qui cherchent à réglementer les levés en mer ou, plus particulièrement, la définition des positions en mer. En fait, les organismes nationaux chargés de la réglementation de l'exploration pétrolière accordent si peu d'attention aux levés qu'il est rare de trouver dans les permis de recherche une définition rigoureuse des limites autorisées; les sociétés pétrolières peuvent interpréter à leur façon les vagues latitudes et longitudes ou les valeurs du quadrillage qui apparaissent dans les documents officiels. En outre, la qualité des levés hydrographiques, des levés géophysiques et des relevés de position exécutés par la suite dans les blocs attribués par permis est laissée entièrement à la discrétion de la société d'exploitation; celle-ci entreprend les travaux qui lui apparaissent nécessaires pour s'acquitter de ses obligations de travail immédiates. Ces lacunes sont encore plus graves si la société d'exploitation n'a pas son propre service géodésique et confie tout bonnement la gestion des contrats de levé à des employés d'une autre discipline qui s'intéressent à la question certes, mais qui n'y consacrent qu'une partie de leur temps et qui sont rarement bien informés. Les situations de ce genre posent à la société des problèmes d'exploitation immédiats. En effet, l'entreprise n'engage aucun effort ni aucune dépense qui ne lui semble pas (par ignorance peut-être) absolument nécessaire. Or, ce comportement fait sans aucun doute subir des pertes à l'entreprise en question, aux autres sociétés qui pourront se joindre au projet et au pays d'accueil. Celui-ci obtient, au sujet de son territoire marin, des données qui ne sont pas toujours fiables. Il lui est impossible de tenir un dossier ordonné et complet des levés et des travaux de positionnement exécutés dans le cadre des travaux d'exploration.

Données produites par les levés en mer

Les levés marins qui relèvent de la compétence de l'arpenteur et de l'hydrographe englobent d'une part l'acquisition des données relatives aux fonds marins et aux étendues d'eau (cette fonction recouvre en partie le rôle de l'océanographe) et d'autre part la détermination des positions, qui constitue une activité des plus importantes car, en établissant des repères, elle assure le lien entre les diverses phases de la recherche et de la production des minéraux. Les données issues de chacune de ces activités s'accumulent dans les archives des sociétés d'exploitation à un rythme effréné. C'est particulièrement le cas depuis une dizaine d'années, les gouvernements des pays d'accueil ayant renforcé les conditions de leurs permis et obligé les entreprises à exécuter une charge de travail plus lourde dans des délais plus courts.

Les résultats des levés, qu'il s'agisse de données géophysiques ou de positions, sont généralement conservés par la société d'exploitation. Dans certains cas, des données physiques sur les fonds marins et les conditions océanographiques peuvent être communiquées à des organismes de recherche nationaux qui en ont besoin ou qui, occasionnellement, participent aux travaux de recherche. Dans quelques pays, comme en Norvège et en Grande-Bretagne, les conditions environnementales sont telles qu'il faut procéder à des levés par sonar latéral avant et après le forage. Dans les pays où le problème des pêches ne se pose pas, on se préoccupe moins de la question, mais on réclame habituellement la suppression des obstacles majeurs.

Les positions peuvent être transmises à des partenaires sous forme de cartes ou de bandes numériques condensées, échangées ou vendues à d'autres entreprises en même temps que les données sismiques ou les diagraphies auxquelles elles se rattachent, et communiquées aux organismes nationaux chargés de réglementer la recherche et l'exploitation des minéraux en mer. Contrairement à ce qui se passe au Canada, ces organismes n'ont presque jamais de responsabilité nationale dans le domaine des levés, et c'est pourquoi la réglementation est rarement appliquée aux travaux exécutés au large des côtes. Tant qu'ils ne seront pas investis d'un pouvoir de réglementation dans ce domaine, cette situation va probablement persister presque partout dans le monde.

Divers autres organismes peuvent exiger d'être informés des positions des ouvrages qui constituent un risque pour la navigation, les pêches ou le mouillage, tels que les installations de forage, les plates-formes ou les divers appareils déposés sur les fonds marins, encore qu'ils se contentent de vagues coordonnées géographiques ou d'une carte à petite échelle, qui n'ont d'autre but que d'inviter navigateurs et pêcheurs à la prudence aux abords de ces obstacles. Toutes les coordonnées des puits doivent être communiquées à l'organisme chargé de la recherche des minéraux, généralement dans un rapport soumis par l'entrepreneur chargé du positionnement du navire de forage, mais la nature de la méthode de positionnement ou les critères géodésiques appliqués à la détermination de ces coordonnées sont rarement établis à l'avance. On laisse le soin à la société d'exploitation d'entreprendre les travaux qu'elle estime nécessaire. Voici des exemples de règles adoptées à l'extérieur de l'Amérique du Nord pour définir des positions en mer en vue de la recherche d'hydrocarbures.

Le mer du Nord

Dans le Nord-ouest de l'Europe, en particulier dans la mer du Nord, les organismes maritimes nationaux se sont mis d'accord dès les années 1960 pour que toutes les limites et positions en mer soient définies en fonction de l'Ellipsoïde international basé sur la station origine de la triangulation européenne de 1950 (ED50). Pour établir ce réseau de coordonnées en mer, il a fallu s'en remettre à des systèmes de positionnement radio, notamment le Hi-Fix, basés sur des stations côtières dont les positions étaient exprimées, du mieux qu'on le pouvait à cette époque, en valeurs ED50. Les positions des sondages sismiques, des puits et des pipelines furent toutes déterminées, souvent avec deux lignes de position seulement, en fonction du réseau ED50. Puis, les travaux de prospection progressèrent vers des régions situées hors de la portée des systèmes de positionnement radio à 2MHz, et il fallu recourir à d'autres méthodes de localisation. On se rendit compte alors que les lacunes des réseaux de triangulation de premier ordre ne permettaient pas d'appliquer uniformément le ED50 sur le périmètre de la mer du Nord, provoquant des écarts entre les positions déterminées des deux côtés. Puis sont apparues les techniques de positionnement par satellite Doppler; encore aujourd'hui, on s'en sert couramment pour confirmer les positions des forages et détecter les erreurs systématiques du positionnement radio. La United Kingdom Offshore Operators Association a formulé et recommandé des spécifications pour ce travail. Plus récemment, l'Ordnance Survey britannique a été invitée à participer à la mise à jour des procédures proposées. On croit que cette collaboration entre l'industrie et l'organisme national permettra de recommander d'autres normes en s'inspirant de l'exemple canadien. L'Ordnance Survey a récemment fait l'objet d'un examen poussé et, entre autres, le comité d'examen a déclaré ce qui suit:

> "Nous concluons qu'il est nécessaire à long terme d'établir un réseau géodésique en mer et que ce besoin découle surtout, mais pas uniquement, de l'intérêt grandissant suscité par l'exploitation des ressources sous-marines. Le positionnement approché qu'on utilise actuellement en mer ne sera pas suffisamment précis pour satisfaire ce besoin à long terme, quoiqu'il pourrait bien constituer un point de départ utile. Il y a à première vue de bonnes raisons pour que l'Ordnance Survey, en sa qualité de conservateur des archives géodésiques nationales, entreprenne la saisie de données en mer en guise de prolongement de son réseau géodésique terrestre, mais d'autres discussions devront avoir lieu entre les diverses parties intéressées au sujet du partage des responsabilités. Nous recommandons que l'Ordnance Survey amorce de telles discussions."

Les recommandations du comité d'examen n'ont pas encore été acceptées dans leur ensemble par le gouvernement, et rien ne garantit que l'Ordnance Survey pourra, compte tenu du rendement commercial auquel le gouvernement s'attend de lui, étendre son champ d'activités à un nouveau secteur sans être certain que le coût d'une telle mesure pourra être recouvré, vraisemblablement par l'industrie pétrolière. Jusqu'ici, l'industrie a fonctionné sans intervention directe de l'Ordnance Survey, quoiqu'elle a fait appel à cet organisme pour obtenir des coordonnées de stations terrestres ou encore des conseils sur les transformations Doppler. L'industrie pourrait continuer à s'accommoder d'arrangements occasionnels de ce genre, mais il semble qu'un resserrement des liens entre les prospecteurs, l'Ordnance Survey et le Department of Energy pourrait aboutir à la formulation d'un train de recommandations sur les procédures de levé et à l'établissement d'un bon système de références géodésiques pour le plateau continental du Royaume-Uni.

Entre temps, dans les eaux hollandaises, le Service hydrographique de la Marine royale des Pays-Bas a pris la tête des travaux dans ce pays, en produisant un rapport détaillé sur la définition des positions dans la partie hollandaise de la mer du Nord. Ce rapport pourrait aussi déboucher sur des recommandations quant à la méthodologie et à la réglementation des futures activités des sociétés d'exploration.

Nul exploitant n'est actuellement tenu de se conformer aux lignes directrices de la United Kingdom Offshore Operators Association, ni même d'utiliser un récepteur Doppler, s'il est convaincu que le système de positionnement radio définit convenablement la position des puits. De nos jours, on utilise habituellement le Pulse 8 ou, dans le sud de la mer du Nord et dans la Manche, le Syledis. On emploie rarement deux systèmes de positionnement radio et rien n'oblige les exploitants à le faire. Cependant, il existe maintenant des spécifications concernant la redondance des lignes de position.

Une fois que la position d'un puits d'exploration a été fixée, on ne conserve pas nécessairement les coordonnées mesurées alors; on peut les ramener à des valeurs que l'on juge plus conformes à la réalité, en tenant compte des nouvelles transformations ou des modifications apportées aux coordonnées des radiobornes côtières. Ces changements sont habituellement mineurs, et, jusqu'ici, seules les sociétés pétrolières elles-mêmes se sont montrées intéressées à utiliser les valeurs corrigées. L'Ordnance Survey n'a pas encore exigé que les positions marines lui soient communiquées; le Hydrographic Department se contente d'un degré d'exactitude qui lui permet de porter les positions sur la carte à 1:200 000, tandis que le service topographique militaire les obtient par personne interposée, sans se soucier de leur fiabilité. En fait, la seule occasion où ces organismes ont pris part directement à la détermination de positions en mer, c'est lorsqu'ils ont participé au positionnement d'une plate-forme adjacente à la ligne médiane entre le Royaume-Uni et la Norvège, il y a quelques années.

En outre, les positions des plates-formes dans la mer du Nord sont déterminées en fonction des exigences de la société d'exploitation; elles doivent être suffisamment exactes et constantes pour servir de stations de base à des systèmes de positionnement par micro-ondes, utilisés à leur tour pour des levés sismiques de précision à trois dimensions, pour des travaux de construction et pour le positionnement dynamique des travaux de plongée à saturation en eaux profondes. Il n'existe pas de norme pour marquer ou définir des stations géodésiques sur des plates-formes, ni de méthode uniforme pour établir leurs coordonnées. Néanmoins, pour un groupe de plates-formes à portée de vue mutuelle, comme celles du bassin East Shetland, la société Shell a observé un réseau terrestre de distances et de directions, afin d'augmenter la densité de points Doppler, et exécuté une compensation. Dans ce cas-ci, le réseau initial, basé sur une seule détermination Doppler à trois dimensions, est demeuré inchangé. Il se pourrait que les autres plates-formes mises en place en 1981 donnent lieu à une réévaluation des positions des points du canevas, mais on ne croit pas qu'un tel travail entraînerait des changements importants dans les posi-

tions des systèmes Syledis et Miniranger. On peut s'interroger sur l'importance des déplacements de l'ordre de quelques mètres dans le cas des gisements qui chevauchent des limites fixées par permis, mais disons qu'en règle générale, ce n'est pas un problème qui donne beaucoup de mal aux négociateurs des sociétés pétrolières. Dans d'autres secteurs de la mer du Nord, des exploitants ont conjugué leurs efforts pour observer d'autres petits réseaux Doppler, habituellement dans le but d'améliorer la précision des stations de base des systèmes de positionnement par micro-ondes qui sont installées sur des plates-formes.

Côte du Gabon

Le Gabon n'a pas de réseau géodésique national; il possède plutôt un ensemble de réseaux distincts mais interreliés. La détermination des positions sur son plateau continental est effectuée en fonction d'une série de stations côtières alignées, distancées de 5 à 10 km et établies par cheminement au telluromètre de deuxième ordre, qui servent de stations de base aux systèmes Miniranger, Syledis ou Maxiran. Ce travail a été entrepris par la société pétrolière Elf, au début des travaux d'exploration en mer, à l'époque où cette compagnie détenait la totalité de la marge continentale du Gabon sous permis d'exploration. Par la suite, la société Elf a abandonné des concessions au profit d'autres sociétés d'exploitation, très heureuses de pouvoir utiliser les stations géodésiques de l'Elf, qui étaient toute repérées par des piliers de béton massifs dont certains avaient 10 pieds de hauteur. Ainsi, toutes les positions relevées au large des côtes du Gabon de même que les stations de base des systèmes de positionnement radio établies sur beaucoup de plates-formes sont fixées à ce cheminement, dont la position absolue a été déterminée par rapport à une détermination astronomique qui sert de point origine national. (La société Shell a par la suite employé des points déterminés par satellite Doppler pour ses travaux terrestres et y a peut-être inclus des stations du cheminement côtier.) Les positions déterminées en mer sont communiquées au ministère du Pétrole, mais il n'existe pas de réglementation des levés en mer.

Côte tunisienne

La Tunisie dispose d'un réseau national de triangulation de premier ordre qui est en bon état et dont les coordonnées publiées sont évaluées par l'IGN de Paris en fonction du point origine de Carthage local et d'un ellipsoïde de Clarke de 1880 modifié. A terre, on utilise une projection de Lambert à 3 fuseaux, dont chacun a deux parallèles d'échelle conservée.

Dans ce pays, la réglementation des levés ne s'applique pas au domaine marin, et les sociétés d'exploitation sont libres de déterminer les positions et de présenter les données sous forme de carte au moyen de la méthode qu'elles désirent. Par le passé, certains exploitants n'utilisaient que le satellite Doppler et le sonar pour localiser des sondages sismiques, cartographier les données en fonction d'un point origine d'un système de radiodiffusion Doppler ou rapporter arbitrairement les positions à un point origine européen au moyen des 3 translations normalisées que l'on publiait alors. Cependant, tous les exploitants ont maintenant pour politique d'exiger que leurs sous-traitants utilisent des systèmes de radiolocalisation basés sur des stations côtières relevées à partir du réseau de triangulation de premier ordre et, du même coup, évaluées en fonction du point origine de Carthage. En exécutant des observations par satellite Doppler en quelques points du réseau de triangulation de premier ordre adjacents à des zones d'exploitation marine, on a évalué des déplacements de surface de référence afin de corriger les positions calculées précédemment pour des cartes sismiques et des installations de forage. Aujourd'hui, le positionnement en mer s'effectue en majeure partie au moyen du système Syledis, basé sur des stations côtières choisies dont les coordonnées sont constantes et rapportées au point origine de Carthage.

La projection cartographique utilisée pour la présentation des données marines est également laissée à la discrétion de l'exploitant; les sociétés qui exécutent des travaux sur la terre ferme, comme la BP, s'en tiennent à la projection Lambert utilisée sur les cartes terrestres, mais celles qui travaillent dans des zones marines, où le quadrillage Lambert est assez convergent, préfèrent la projection U.T.M.

Dans les contrats d'exploitation des sociétés pétrolières, les limites sont indiquées en latitudes et en longitudes espacées de 2 minutes mais, là encore, les sociétés pétrolières doivent supposer que les coordonnées sont rapportées à l'ellipsoïde de Clarke de 1880 et au point origine de Carthage du canevas terrestre. Aucune réglementation n'est encore appliquée aux méthodes d'exécution ou de présentation des levés en mer.

Émirats Arabes Unis (golfe Persique)

Les Émirats Arabes Unis n'ont pas encore de canevas géodésique unifié à l'échelle du pays ni de service topographique proprement dit. Les stations géodésiques qui existent sur la terre ferme, dans les îles et sur les plates-formes ont été établies par des sociétés pétrolières et des entreprises de cartographie, qui ont cherché à satisfaire leurs besoins immédiats sans trop se préoccuper de leurs besoins à long terme. Les villes militaires et les municipalités importantes ont des services topographiques. L'armée devient peu à peu un organisme géodésique national; elle procède actuellement à l'élaboration de contrats qui ont pour but de produire un canevas géodésique national et une série de cartes de base. Cependant, les levés sont mal coordonnés à l'intérieur des Émirats, et beaucoup de travaux font double emploi, tant en cartographie qu'en géodésie.

Le canevas principal est constitué d'une chaîne de triangulation de troisième ordre établie sur la côte des Pirates, qui a été mise en place et levée pour la première fois au cours des années 60 par un arpenteur solitaire et dévoué d'une société pétrolière. La chaîne a par la suite été renforcée par des observations EDM et ramenée à un point origine iraquien (Nahrwan) du réseau de triangulation des services pétroliers iraniens par un cheminement à travers le golfe au détroit d'Ormuz et, de là, rattachée à un point origine européen. Pour l'instant, on envisage d'augmenter, d'étendre et d'observer à nouveau la chaîne de la côte des Pirates, d'établir un canevas d'ordre zéro constitué d'une douzaine de points déterminés par satellite Doppler et de relier l'ensemble du réseau au point origine de Saudi Ain el Abd, qui sera vraisemblablement adopté comme le point origine pour l'ensemble de la péninsule Arabique.

La principale société pétrolière du pays, Offshore Abu Dhabi, qui utilise les services d'arpenteurs de la BP, a exécuté la triangulation à travers une série d'îles et de gisements en production et, par translocation élémentaire, établi d'autres points Doppler pour renforcer la chaîne de triangulation. Au moyen de diverses méthodes allant du Decca Navigator au système le plus utilisé actuellement, le Syledis, en passant par les systèmes

locaux Trisponder et Miniranger, toutes les positions relevées en mer ont été rattachées à la triangulation de la côte des Pirates et rapportées au point origine de Nahrwan (Clarke 1880). La principale société pétrolière de la région travaillant sur la terre ferme, qui elle aussi fait appel aux services d'arpenteurs de la BP, a toujours eu une préférence pour ce système. Sous l'influence de ces deux sociétés, les entreprises venues par la suite ont utilisé le canevas déjà établi. Ainsi, malgré l'absence d'un réseau national et le manque d'intérêt pour ce problème, les positions en mer ont pu être définies en fonction d'un même canevas. Il appert également que les levés ne sont pas réglementés et que tous les dossiers se rapportant à ces activités demeurent entre les mains de la société d'exploitation et de ses sociétés parentes. Il faudra vraisemblablement attendre plusieurs années avant de constater les effets de ce canevas sur les levés en mer, mais il est probable que les positions de toutes les structures permanentes qui s'y trouvent devront tôt ou tard être redéfinies.

Côte brézilienne

Comme il sied à un grand pays pourvu de richesses abondantes et favorisé par une économie en expansion, le Brézil possède un institut géodésique national bien établi et, sauf pour le bassin de l'Amazone, un réseau de chaînes de triangulation qui ne sont pas toutes bien préservées, mais dont une en particulier s'allonge sur toute la côte de l'Atlantique. Ce réseau offre des stations de base tout indiquées pour des systèmes de radiolocalisation en mer. Cependant, ni l'institut géodésique national ni l'institut hydrographique ne jouent un rôle dans l'exploration pétrolière en mer au Brézil, dont la gestion est entièrement assurée par la société pétrolière d'État, la Petrobras. Avant l'arrivée des sociétés d'exploration étrangères, la Petrobras a elle-même exécuté tous ses travaux d'exploration et prescrit toutes les dispositions des levés. Lorsqu'elle a entrepris ses travaux terrestres dans le nord-est du pays, elle a établi son propre point origine (Aratu) pour exécuter des levés indépendamment du point origine du canevas national qui était utilisé à cette époque en géodésie et en cartographie; par la suite, elle a continué à s'en servir, tant sur terre qu'en mer. Les sociétés pétrolières étrangères ont été obligées d'adopter le même système, ainsi que les coordonnées des stations côtières dont la Petrobras s'était servie comme stations de base de ses chaînes de positionnement radio et dont les positions avaient été déterminées par un long cheminement côtier au telluromètre. La façon dont certaines de ces stations se rattachent au canevas national et au réseau de radiodiffusion Doppler est parfois obscure et quelque peu irrégulière. Le système de radiodiffusion Doppler est basé sur un ensemble de points doppler 3D du réseau de premier ordre qui manquent beaucoup de régularité.

Les sociétés d'exploitation rendent compte de tous leurs levés à la Petrobras, qui a son propre service géodésique, mais qui se contente de lire les rapports et laisse les méthodes d'exploitation à la discrétion des sociétés. La principale préoccupation de ces entreprises est de voir à ce que les positions restent constantes d'une phase à l'autre de l'exploration. Même les positions fournies par la Petrobras ont, parfois pour des raisons historiques, une origine et une fiabilité douteuses.

Côte de la Chine

Les travaux géodésiques de la Chine, comme beaucoup d'autres activités dans ce pays, sont difficiles à observer. Lorsque les sociétés pétrolières occidentales ont été autorisées à commencer des travaux de prospection marine en 1979, les groupes d'exploitation ont soumis des projets de programme, notamment pour la détermination des positions, aux divers organismes chinois qui s'intéressaient à l'exploration pétrolière. Dès le début des discussions, il est apparu clairement que, même si la Chine possédait un réseau géodésique unifié qui couvrait la majeure partie de son territoire (point origine de Pékin, ellipsoïde de Krassowski), il s'était fait très peu de levés en mer et, par conséquent, les Chinois étaient peu au courant des méthodes de radiolocalisation modernes et des possibilités dans ce domaine. Un système Toran avait toutefois été employé dans le golfe de Po-Hai, et on croyait que d'autres systèmes militaires existaient ailleurs, mais que leur emploi était interdit à des civils. Les sociétés d'exploitation, BP et Total dans la mer Jaune et six entreprises américaines dans la mer de Chine Méridionale, étaient donc libre d'adopter les méthodes de travail qui convenaient le mieux à leur programme de nature essentiellement exploratoire. Les entreprises stationnées dans le nord ont choisi un système Pulse 8 à 4 stations et 3 configurations, tandis que dans le sud, on a opté pour l'Argo et le Maxiran. Il leur a fallu négocier les emplacements des stations de base, puis déterminer les coordonnées sans avoir accès aux descriptions ou aux coordonnées des points de triangulation avoisinants. Elles ont demandé aux Chinois de lever les emplacements et de fournir les coordonnées de 5 stations côtières de la mer Jaune et, pour obtenir un canevas uniforme et pouvoir le rattacher sans risque d'erreur au grand réseau géodésique chinois, elles ont exécuté, par mesure de précaution, une translocation Doppler entre des stations. Au début, les stations méridionales des systèmes Argo et Maxiran ont été relevées au moyen de déterminations Doppler 3D à point unique. Par la suite, les entreprises ancrées dans le sud ont dû convertir toutes leurs coordonnées au réseau géodésique national de la chine au moyen des translations de point origine communiquées par les Chinois. Toutes les sociétés ayant participé au programme de reconnaissance sismique de 1979-80 attendent maintenant que la Chine fasse connaître ses intentions et réglemente les travaux d'exploration. Il est probable que les méthodes et les exigences des levés marins seront encore une fois exemptées d'une réglementation rigoureuse et laissées à la discrétion des sociétés pétrolières.

Conclusion

Ces quelques exemples démontrent clairement que le Canada a peu à apprendre des autres pays en ce qui concerne la gestion des travaux de position exécutés en mer.

Les règlements en vigueur au Canada et les lignes directrices énoncées dans l'édition de 1975 de "*Surveying Offshore Canada Lands for Mineral Resources Development*" sont uniques.

L'auteur n'a jamais vu de documents comparables dans aucun des pays où a travaillé la société d'exploration qu'il représente. Il y aura peut-être lieu de réviser les règlements pour tenir compte de l'évolution de la situation au Canada. Cependant, ces documents pourraient fort bien servir de modèles aux organismes de réglementation des autres pays, qui finiraient par reconnaître l'importance de bonnes méthodes de positionnement pour le déroulement des travaux en mer et faire en sorte que, par l'entremise d'un service géodésique reconnu, toutes les sociétés d'exploitation utilisent une méthodologie uniforme pour l'ensemble du pays et basée sur un système géodésique

unique. Cependant, il faut éviter de rendre la réglementation rigoureuse au point d'exercer une tyrannie sur les arpenteurs, comme ce fut le cas jadis dans certains territoires coloniaux; les méthodes et les précisions des levés en mer ne doivent pas nécessairement obéir à des règles aussi exigeantes que sur la terre ferme. Ce qui est important, c'est de définir les paramètres géodésiques à utiliser (qui sont généralement les mêmes que sur le bloc continental), de réglementer les méthodes (plutôt que les instruments ou les systèmes) de détermination des positions et de créer un mécanisme au moyen duquel toutes les entreprises feraient rapport à un ou plusieurs établissements nationaux, où les résultats pourraient être interprétés et vérifiés, et les données utilisées à d'autres fins nationales.

La British Petroleum Company ne partage pas nécessairement les idées exprimées ci-dessus.

Appendice B

La position de la Garde côtière canadienne sur les aides à la navigation requises dans l'Arctique

Jusqu'à maintenant, les activités maritimes dans l'Arctique se limitaient au ravitaillement de collectivités, au transport de céréales en provenance de Churchill et à d'autres services de transport pour le compte de sociétés de prospection minérale. Dans presque tous les cas, les marchandises étaient transportées dans des navires conçus pour la navigation dans des eaux libres de glace pendant la saison estivale.

Or les projets pétroliers et gaziers qui verront probablement le jour ici et là dans l'Arctique obligeront les transporteurs à emprunter le passage du Nord-ouest douze mois par année.

Les services maritimes nécessaires au transport de ces biens sont d'autant plus difficiles à planifier qu'il subsiste encore deux points d'interrogation majeurs: d'une part l'ampleur réelle de l'activité maritime qui s'ensuivra et d'autre part la date de l'instauration de ces services maritimes.

Les opinions exprimées dans le présent document de travail valent pour toutes les eaux situées au nord du 60e degré de latitude, auxquelles s'appliquent la *Loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques*, ainsi qu'à la baie d'Hudson, à la baie James, à la baie d'Ungava, et au réseau du fleuve Mackenzie.

Hypothèses de travail

1. Sous réserve des paragraphes 2 et 3 ci-dessous, la planification des ressources nécessaires aux aides à la navigation s'effectue en fonction d'une situation du transport maritime dans laquelle:

a) le gaz naturel liquéfié serait transporté à longueur d'année entre l'inlet Bridport, dans l'île Melville, et l'Est du Canada, à compter du début de 1986.

b) les gros transporteurs de pétrole brut navigueraient à longueur d'année entre la mer de Beaufort et l'Est du Canada par la route du passage du Nord-ouest, à compter de la fin de 1987.

c) les transporteurs de GNL navigueraient à longueur d'année entre l'île Roi-Christian et l'Est du Canada à partir de 1990 environ.

d) le transport saisonnier des céréales en provenance de Churchill se poursuivrait à peu près aux niveaux actuels.

e) les mouvements saisonniers des minéraux augmenteraient de façon modérée.

f) le transport saisonnier destiné au ravitaillement des collectivités augmenterait de façon modérée.

2. Il faut conférer suffisamment de souplesse au programme des aides à la navigation pour être en mesure de l'adapter à une nouvelle répartition des ressources qu'il faudrait mettre en oeuvre si la mise en valeur de l'Arctique se produisait plus lentement qu'il n'est prévu dans le scénario exposé ci-dessus.

3. L'établissement des aides à la navigation et l'application de la loi rendant obligatoires l'adoption et l'utilisation des aides à la navigation sur les navires devraient être coordonnés.

Étendue des services

1. Les aides à la navigation doivent être suffisantes en quantité et en qualité pour atteindre les objectifs fixés aux chapitres de la sécurité, du rendement des systèmes et de la contribution du gouvernement fédéral. Pour déterminer l'étendue des services, il faut tenir compte du coût de la prestation et de l'entretien des aides à la navigation.

2. Les aides à la navigation nécessaires à destination ou en provenance d'un port de ravitaillement, qu'elles soient de type classique ou électronique, doivent être suffisantes en quantité et en qualité pour assurer une protection adéquate aux navires de transport.

3. Les aides à la navigation destinées aux navires qui desservent un port commercial sont généralement financées, gérées et exploitées par la principale entreprise mouillant à ce port.

Politique de la prestation des aides Maritimes

1. Des aides à la navigation doivent être fournies au besoin pour assurer une protection adéquate aux navires de transport et à l'environnement et, s'il y a lieu, pour améliorer le rendement des activités maritimes.

2. La prestation, l'exploitation et l'entretien des aides à la navigation sont la responsabilité de l'Administration maritime, sauf dans les couloirs d'approche et dans les limites des ports commerciaux privés, où ces fonctions incombent alors à la principale entreprise mouillant à ce port.

3. S'il y a lieu, une entreprise peut confier à l'Administration maritime, par contrat, la prestation, l'exploitation et l'entretien des aides à la navigation offertes à des ports commerciaux privés, conformément au régime de recouvrement des coûts approuvé pour l'Arctique.

4. Les aides à la navigation fournies, exploitées et entretenues par les entreprises doivent être conformes à des normes établies par Transports Canada.

5. Les aides à la navigation ne doivent normalement être établies que dans des régions dont il existe des cartes convenables.

6. Des aides à la navigation doivent être fournies de façon continue dans chaque couloir maritime désigné de l'Arctique, pendant toute la durée de la saison maritime.

7. La prestation des aides à la navigation doit dépendre de l'adoption et de l'utilisation d'outils complémentaires, comme le prescrit la loi.

Position de la Garde côtière canadienne

Aperçu des exigences

L'organisation des aides à la navigation maritime au nord du 60e de latitude nord doit viser à rendre les navires aussi autonomes que possible à l'aide de systèmes en place ou de

systèmes qui font actuellement l'objet de travaux d'amélioration ou de mise au point.

On croit que le matériel classique à haut rendement peut répondre à la plupart des besoins de la navigation, à condition que les outils complémentaires tels que cartes, publications et communications radio soient adéquats et fiables.

Cela ne s'applique pas à la détection des glaces, dont les besoins particuliers peuvent être satisfaits en partie par certains appareils de navigation à haut rendement, comme le radar.

Lorsque la précision de la navigation est particulièrement importante à cause de la présence de dangers connus ou du peu d'espace pour manoeuvrer, les aides à la navigation devront être secondées par des systèmes complémentaires, ou de nouveaux systèmes devront être établis. Pour l'instant, on ne possède pas suffisamment d'information pour déterminer le degré de précision requis dans les zones de la mer de Beaufort où l'on sait qu'il existe des pingos. Il faudra procéder à d'autres sondages hydrographiques pour en connaître davantage.

Les aides à la navigation les plus efficaces combineront le gyroscope, le loch, le radar et le système Satnav. Dans les régions où une très grande précision est de rigueur, ces aides pourront être réunies en un ou plusieurs systèmes capables de fournir de bonnes positions radar-Doppler entre des points Satnav. Le doppler de poursuite, l'Omega différentiel, le RACON et d'autres systèmes analogues peuvent founir des mises à jour suffisamment précises pour permettre aux navigateurs d'emprunter des chenaux en toute sécurité.

Les futurs satellites de navigation du Réseau global de positionnement (GPS) devraient satisfaire amplement tous les besoins, sauf lorsqu'une précision absolue est de rigueur.

Il faudra peut-être avoir recours à des systèmes particuliers d'une très grande précision dans les entrées des ports. Cependant, il appartiendra essentiellement aux exploitants de les fournir.

Planification détaillée

En se se fondant sur la Politique de la prestation des aides à la navigation approuvée par Transports Canada et sur les nombreuses discussions que ses membres ont eues entre eux et avec l'industrie, la Garde côtière entrevoit la situation suivante en ce qui concerne les aides à la navigation dans l'Arctique. Il est important de reconnaître qu'avant d'utiliser des aides à la navigation et des systèmes de navigation de bord, il faudra procéder à de bons sondages hydrographiques et, dès que possible, obtenir les cartes nécessaires.

Les techniques radar assistées (RACON, réflecteurs radar) seront les outils les plus précieux lorsque la région étudiée se trouvera à leur portée, c'est-à-dire en deçà de 25 milles marins. Au delà de cette distance, on ne pourra exiger d'elles une précision supérieure à environ 1 mille marin; la principale aide à la navigation sera alors le Satnav secondé par divers appareils de bord, comme le sondeur bathymétrique et le compas gyrostatique.

On étudie actuellement le système Omega très basses fréquences, en vue de déterminer s'il rendrait possible la navigation à l'estime entre des positions déterminées par satellite. On se penche également sur les possibilités du Loran-C dans l'Arctique. On croit néanmoins que les aides à la navigation mentionnées ci-dessus suffiront à la tâche.

Dans les parties de la mer de Beaufourt qui sont hors de la portée du radar, on se contentera d'une précision d'environ 1 mille marin à bord des navires existants. Cependant, si le sondage de la voie maritime devant être empruntée par des navires à fort tirant révèle une grande fréquence de pingos, la navigation devra s'effectuer à environ un quart de mille marin près. Cette précision peut nécessiter l'établissement d'une chaîne mini-Loran C. Avant de rendre une décision finale, la Garde côtière procédera à d'autres évaluations des systèmes Omega, afin de déterminer si l'Omega différentiel pourrait fournir une précision d'environ un quart de mille marin.

Pour l'entrée dans le détroit d'Hudson, une radiobalise très puissante sera établie à l'île Button. Des stations RACON sont actuellement mises en place à des points importants le long du détroit d'Hudson et dans la baie d'Ungava.

Appendice C

NATIONS UNIES

TROISIÈME CONFÉRENCE SUR LE DROIT DE LA MER

Reprise de la dixième session, Genève, du 3 au 28 août, 1981

Projet de convention sur le droit de la mer

Partie VI — Plateau continental

Partie VI
Plateau continental

Article 76
Définition du plateau continental

1. Le plateau continental d'un État côtier comprend les fonds marins et leur sous-sol au-delà de sa mer territoriale, sur toute l'étendue du prolongement naturel du territoire terrestre de cet État jusqu'au rebord externe de la marge continentale, ou jusqu'à 200 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale, lorsque le rebord externe de la marge continentale se trouve à une distance inférieure.

2. Le plateau continental ne s'étend pas au-delà des limites prévues aux paragraphes 4 à 6.

3. La marge continentale est le prolongement immergé de la masse terrestre de l'État côtier; elle est constituée par les fonds marins correspondant au plateau, au talus et au glacis ainsi que leur sous-sol. Elle ne comprend ni les grands fonds des océans, avec leurs dorsales océaniques, ni leur sous-sol.

4. (a) Aux fins de la Convention, l'État côtier définit le rebord externe de la marge continentale, lorsque celle-ci s'étend au-delà de 200 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale, par:

(i) une ligne tracée conformément au paragraphe 7 par référence aux points fixes extrêmes où l'épaisseur des roches sédimentaires est égale au centième au moins de la distance entre le point considéré et le pied du talus continental; ou

(ii) une ligne tracée conformément au paragraphe 7 par référence à des points fixes situés à 60 milles marins au plus du pied du talus continental.

(b) Sauf preuve du contraire, le pied du talus continental coïncide avec la rupture de pente la plus marquée à la base du talus.

5. Les points fixes qui définissent la ligne marquant, sur les fonds marins, la limite extérieure du plateau continental, tracée conformément au paragraphe 4, lettre a), points i) et ii), sont situés soit à une distance n'excédant pas 350 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale, soit à une distance n'excédant pas 100 milles marins de l'isobathe de 2 500 mètres, qui est la ligne reliant les points de 2 500 mètres de profondeur.

6. Nonobstant le paragraphe 5, sur une dorsale sous-marine, la limite extérieure du plateau continental ne dépasse pas une ligne tracée à 350 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale. Le présent paragraphe ne s'applique pas aux hauts-fonds qui constituent des éléments naturels de la marge continentale, tels que les plateaux, seuils, crêtes, bancs ou éperons qu'elle comporte.

7. L'État côtier fixe la limite extérieure de son plateau continental, quand ce plateau s'étend au-delà de 200 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale, en reliant par des droites d'une longueur n'excédant pas 60 milles marins des points fixes définis par des coordonnées en longitude et en latitude.

8. L'État côtier communique des informations sur les limites de son plateau continental, lorsque celui-ci s'étend au-delà de 200 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale, à la Commission des limites du plateau continental constituée en vertu de l'annexe II sur la base d'une représentation géographique équitable. La Commission adresse aux États côtiers des recommandations sur les questions concernant la fixation des limites extérieures de leur plateau continental. Les limites fixées par un État côtier sur la base de ces recommandations sont définitives et de caractère obligatoire.

9. L'État côtier remet au Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies les cartes et renseignements pertinents, y compris les données géodésiques, qui indiquent de façon permanente la limite extérieure de son plateau continental. Le Secrétaire général donne à ces documents la publicité voulue.

10. Le présent article ne préjuge pas de la question de la délimitation du plateau continental entre des États dont les côtes sont adjacentes ou se font face.

Article 77
Droits de l'État côtier sur le plateau continental

1. L'État côtier exerce des droits souverains sur le plateau continental aux fins de son exploration et de l'exploitation de ses ressources naturelles.

2. Les droits visés au paragraphe 1 sont exclusifs en ce sens que si l'État côtier n'explore pas le plateau continental ou n'en exploite pas les ressources naturelles, nul ne peut entreprendre de telles activités sans son consentement exprès.

3. Les droits de l'État côtier sur le plateau continental sont indépendants de l'occupation effective ou fictive, aussi bien que de toute proclamation expresse.

4. Les ressources naturelles visées dans la présente partie comprennent les ressources minérales et autres ressources non biologiques des fonds marins et de leur sous-sol, ainsi que les organismes vivants qui appartiennent aux espèces sédentaires, c'est-à-dire les organismes qui, au stade où ils peuvent être pêchés, sont soit immobiles sur le fond ou au-dessous du fond, soit incapables de se déplacer autrement qu'en restant constamment en contact avec le fond ou le sous-sol.

Article 78
Régime juridique des eaux et de l'espace aérien surjacents, et droits et libertés des autres États

1. Les droits de l'État côtier sur le plateau continental n'affectent pas le régime juridique des eaux surjacentes ou de l'espace aérien qui se trouve au-dessus de ces eaux.

2. L'exercice par l'État côtier de ses droits sur le plateau continental ne doit pas porter atteinte à la navigation ou aux autres droits et libertés reconnus aux autres États par la Convention, ni en gêner l'exercice de manière injustifiable.

Article 79
Câbles et pipe-lines sous-marins sur le plateau continental

1. Tous les États ont le droit de poser des câbles et des pipe-lines sous-marins sur le plateau continental conformément au présent article.

2. Sous réserve de son droit de prendre des mesures raisonnables pour l'exploration du plateau continental, l'exploitation de ses ressources naturelles et la prévention, la réduction et la maîtrise de la pollution par les pipe-lines, l'État côtier ne peut entraver la pose ou l'entretien de ces câbles ou pipe-lines.

3. Le tracé des pipe-lines posés sur le plateau continental doit être agréé par l'État côtier.

4. Aucune disposition de la présente partie n'affecte le droit de l'État côtier d'imposer des conditions à l'entrée de câbles ou de pipe-lines sur son territoire ou dans sa mer territoriale, non plus que sa juridiction sur les câbles et pipe-lines construits ou utilisés dans le cadre de l'exploration de son plateau continental ou de l'exploitation de ses ressources, ou de l'exploitation d'îles artificielles, d'installations ou d'ouvrages relevant de sa juridiction.

5. Lorsqu'ils posent des câbles ou des pipe-lines sous-marins, les États tiennent dûment compte des câbles et pipe-lines déjà en place. Ils veillent en particulier à ne pas compromettre la possibilité de réparer ceux-ci.

Article 80
Îles artificielles, installations et ouvrages sur le plateau continental

L'article 60 s'applique, mutatis mutandis, aux îles artificielles, installations et ouvrages situés sur le plateau continental.

Article 81
Forages sur le plateau continental

L'État côtier a le droit exclusif d'autoriser et de réglementer les forages sur le plateau continental, quelles qu'en soient les fins.

Article 82
Contributions en espèces ou en nature au titre de l'exploitation du plateau continental au-delà de 200 milles marins

1. L'État côtier acquitte des contributions en espèces ou en nature au titre de l'exploitation des ressources non biologiques du plateau continental au-delà de 200 milles marins des lignes de base à partir desquelles est mesurée la largeur de la mer territoriale.

2. Les contributions sont acquittées chaque année pour l'ensemble de la production d'un site d'exploitation donné, après les cinq premières années d'exploitation de ce site. La sixième année, le taux de contribution est de 1 p. 100 de la valeur ou du volume de la production du site d'exploitation. Ce taux augmente ensuite d'un point de pourcentage par an jusqu'à la douzième année, à partir de laquelle il reste de 7 p. 100. La production ne comprend pas les ressources utilisées dans le cadre de l'exploitation.

3. Tout État en développement qui est importateur net d'un minéral extrait de son plateau continental est dispensé de ces contributions en ce qui concerne ce minéral.

4. Les contributions s'effectuent par le canal de l'Autorité, qui les répartit entre les États Parties selon des critères de partage équitables, compte tenu des intérêts et des besoins des États en développement, en particulier des États en développement les moins avancés ou sans littoral.

Article 83
Délimitation du plateau continental entre États dont les côtes sont adjacentes ou se font face

1. La délimitation du plateau continental entre États dont les côtes sont adjacentes ou se font face est effectuée par voie d'accord conformément au droit international tel qu'il est visé à l'article 38 du Statut de la Cour internationale de Justice, de façon à aboutir à une solution équitable.

2. S'ils ne parviennent pas à un accord dans un délai raisonnable, les États intéressés ont recours aux procédures prévues à la partie XV.

3. En attendant la conclusion de l'accord visé au paragraphe 1, les États intéressés, dans un esprit de compréhension et de coopération, font tout leur possible pour conclure des arrangements pratiques provisoires et pour ne pas compromettre ou entraver, pendant cette période de transition, la conclusion de l'accord définitif. Les arrangements provisoires sont sans préjudice de la délimitation finale.

4. Lorsqu'un accord est en vigueur entre les États intéressés, les questions relatives à la délimitation du plateau continental sont réglées conformément à cet accord.

Article 84
Cartes marines et listes de coordonnées géographiques

1. Sous réserve de la présente partie, les limites extérieures du plateau continental et les lignes de délimitation tracées conformément à l'article 83 sont indiquées sur des cartes marines à l'échelle appropriée pour en déterminer l'emplacement. Le cas échéant, le tracé de ces limites extérieures ou lignes de délimitation peut être remplacé par des listes de coordonnées géographiques de points précisant le système géodésique utilisé.

2. L'État côtier donne la publicité voulue aux cartes ou listes de coordonnées géographiques et en dépose un exemplaire auprès du Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies et, dans le cas de celles indiquant l'emplacement de la limite extérieure du plateau continental, auprès du Secrétaire général de l'Autorité.

Article 85
Creusement de galeries

La présente partie ne porte pas atteinte au droit qu'a l'État côtier d'exploiter le sous-sol en creusant des galeries, quelle que soit la profondeur des eaux à l'endroit considéré.

Appendice D

Déplacements locaux de la surface de référence NAD27

Les valeurs des déplacements locaux de la surface de référence à différents points à travers le Canada énumérées au Tableau D-1 et données aux figures D-1, D-2 et D-3 ont été calculées en soustrayant les coordonnées cartésiennes NAD27 des coordonnées cartésiennes d'un point par rapport au centre de la Terre, d'après des observations du satellite Doppler.

Les coordonnées cartésiennes NAD27 ont été calculées (grâce aux équations 2 et 4, chapitre 5) à l'aide des valeurs les plus récentes publiées pour les latitudes et longitudes NAD27. Pour les coordonnées des hauteurs, la meilleure hauteur disponible au-dessus du niveau de la mer a été ajoutée à la hauteur du géoïde au-dessus de l'ellipsoïde de 1866 de Clarke (NAD27). Ces hauteurs du géoïde ont été dérivées d'une modélisation du champ gravimétrique de la Terre connue sous le nom de GEM10B (Goddard Earth Model 10B) augmentée des mesures gravimétriques locales. Le GEM10B consiste en une expansion harmonique sphérique conçue par le United States Goddard Space Centre; il est basé sur 700 coefficients et représente un modèle égal du géoïde à l'échelle mondiale. La partie canadienne des courbes du géoïde GEM10B relatives à l'ellipsoïde de 1866 de Clarke (NAD27) est illustrée à la Figure D-4. La Division des levés géodésiques du Canada a apporté des améliorations au GEM10B compte tenu des mesures gravimétriques locales canadiennes pour élaborer un modèle des variations locales (Lachapelle et Rapp 1982).

TABLE D-I

DÉPLACEMENTS DU SYSTÈME DE RÉFÉRENCE DES COORDONNÉES PUBLIÉES DU NAD 27 À DIVERS ENDROITS AU CANADA

ENDROIT	STATION NOM	STATION NUMÉRO	COORD. PUBLIÉES DU NAD 27 LATITUDE	COORD. PUBLIÉES DU NAD 27 LONGITUDE	ALTITUDE (M)	ÉLÉVATION DU GÉOÏDE UTILISÉE (M)	DÉPLACEMENT LOCAL SYSTÈME DE RÉFÉRENCE X (M)	Y (M)	Z (M)
TERRE-NEUVE									
GRAND BANK	GRAND BANK A	510632	47 04 05.361	55 50 50.584	93.9	26.4	-45	148	180
ST.JOHN'S	SATANT	730180	47 34 17.628	52 41 42.060	71.1	32.0	-41	147	181
ROBINSON	ROBINSONS	36005	48 15 32.534	58 47 59.887	95.9	21.4	-47	150	180
GANDER	GANDER	38000	48 54 48.552	54 42 25.348	216.9	32.1	-43	149	180
WHITE BAY	COW HEAD	39006	49 55 13.020	57 49 15.784	66.8	24.1	-43	153	180
STRAIT OF BELLE	SAVAGE	44000	51 19 13.428	56 42 06.187	18.3	28.2	-41	154	184
DOMINION LAKE	ALDER NB	54008	52 59 24.708	62 02 42.871	430.9	18.0	-40	158	180
WABUSH-LABRADOR	PETITE	48019	53 02 11.895	66 28 35.318	767.9	14.0	-36	159	177
GOOSE BAY	GOOSE BAY SA	650001	53 18 30.075	60 21 53.189	33.5	20.8	-38	158	182
HAMILTON INLET	SNOOK	55023	54 12 31.330	57 46 47.259	78.2	26.9	-40	156	180
MAIN INLET	PAUL	57000	56 31 55.877	61 31 04.024	402.8	21.5	-37	157	179
NOUVELLE-ÉCOSSE ET NOUVEAU-BRUNSWICK									
SABLE ISLAND	RED (4903)	631103	43 57 42.736	59 47 14.096	14.4	15.9	-39	154	180
HALIFAX	SHEARWATER	651090	44 38 17.063	63 30 36.720	50.9	11.1	-40	159	182
INGONISH	SMOKEY	23102	46 35 48.206	60 23 51.099	367.2	17.2	-40	158	184
GRANDE ANSE	GRANDE ANSE	24126	47 48 07.109	65 12 28.655	30.9	13.4	-38	159	178
QUÉBEC									
LAUZON	LAUZON	682007	46 48 52.603	71 09 27.564	121.2	8.8	-34	158	175
NITCHINANECUS	MACARTHUR	30202	47 28 57.154	75 48 29.582	549.2	4.8	-32	163	176
ROBERVAL	POINTE BLEUE	22214	48 32 39.001	72 13 59.191	168.4	5.5	-35	159	176
MATANE, GASPE	MATANE	20204	48 49 15.318	67 33 14.377	88.5	10.2	-36	157	179
OBATOGAMAU LAKE	EXPLORER	35215	49 30 14.767	74 23 02.247	448.2	3.2	-31	161	177
SEPT-ILES	BOULE	21203	50 08 20.343	66 17 16.423	289.7	12.6	-40	160	175
NATASHQUAN	NATASHQUAN N	41210	50 16 57.614	61 49 25.747	96.9	14.3	-42	157	182
LAKE MISTASSINI	PAPA	36211	51 25 55.919	72 52 19.146	446.0	4.9	-34	158	179
ROMAINE RIVER	WHITE	53208	51 29 50.342	63 31 12.636	760.2	16.1	-37	159	179
NITCHEQUON LAKE	ROCK	58200	53 12 33.879	71 20 01.760	622.7	8.3	-34	160	179
FORT GEORGE	FORTGEORGE S	682146	53 50 02.320	78 59 34.153	5.5	-4.3	-34	161	177
SCHEFFERVILLE	SQUAW	49202	54 50 17.873	66 44 46.626	602.5	15.0	-33	159	176
LAKE MINTO	DEC	632000	57 06 42.252	74 35 17.267	306.6	2.6	-31	162	179
FORT CHIMO	CHIMO DOPPLE	742000	58 06 37.073	68 24 52.574	58.7	12.1	-28	159	178
PURTUNIQ	DODIE	692216	61 47 49.844	73 56 55.685	602.9	12.1	-27	163	174
ONTARIO									
WALKERTON	BERVIE	743022	44 07 11.813	81 28 25.632	288.4	3.4	-31	159	174
OTTAWA	GEOLAB	753229	45 23 39.037	75 42 50.096	88.0	5.6	-31	158	176
SUDBURY	N SUDBURY	29316	46 30 15.918	80 56 04.837	347.8	3.5	-31	159	174
SAULT STE MARIE	REPAIR	703315	46 32 12.341	84 18 57.460	246.9	2.4	-30	159	174
TIMMINS	TIMMINS SAT	653050	48 33 56.350	81 22 15.599	292.0	1.9	-34	162	177
THUNDER BAY	MCKENZIE EB	52303	48 34 13.096	88 50 03.284	251.2	2.1	-22	162	175
WHITE RIVER	WHITE RIVER	49315	48 37 46.867	85 11 25.444	597.7	1.2	-23	161	174
FORT FRANCES	HENRI	673221	48 43 21.872	94 21 01.698	336.0	0.6	-21	159	172
LAKE ABITIBI	MACE	28304	49 01 05.784	79 36 39.345	440.6	0.9	-34	161	177
KAPUSKASING	LOWTHER	723007	49 33 15.183	81 00 35.569	253.9	1.7	-22	160	174
SIOUX LOOKOUT	SIOUX	57319	50 05 21.494	92 00 01.082	444.7	3.0	-19	160	173
LAKE NIPIGON	CARIBOU	54304	50 20 11.497	89 08 36.088	437.4	3.1	-21	160	177
MOOSONEE	MOOSONEE	723002	51 16 33.522	80 37 59.893	7.8	-2.4	-26	162	177
ATTAWAPISKAT	ATTA	723022	52 55 24.423	82 25 40.997	9.0	-5.6	-20	161	173
WINISK LAKE	LAST	673211	52 59 13.887	87 21 33.168	214.9	-4.4	-18	160	174
BIG TROUT LAKE	BEARSKIN	673218	53 37 43.370	90 22 55.641	224.6	-3.3	-17	161	171
FLAGSTAFF PT.	WINISK	723026	55 13 47.339	85 07 32.652	18.0	-7.8	-15	157	173
HUDSON BAY	BDY 457A	593457A	56 50 24.271	89 00 06.622	2.4	-9.6	-17	159	177
MANITOBA									
ST.JEAN BAPTISTE	PLUR COULEE	25402	49 08 30.221	97 45 10.787	296.2	11.2	-20	160	173
KILLARNEY	FAIRHALL SEB	25415	49 17 14.897	99 39 23.626	485.7	13.4	-19	162	174
DUCK MTN.	GILL	61407	51 36 34.933	101 18 26.401	692.2	10.2	-15	159	174
LAKE WINNIPEG	STONEY	674104	52 07 37.934	97 29 52.885	221.3	3.8	-19	158	173
REINDEER	REINDEER	754010	52 33 08.354	97 58 22.954	219.0	3.8	-19	159	172
THE PAS	MURPHY	734011	53 44 44.020	101 46 19.661	272.6	5.4	-9	161	175
ISLAND LAKE	ISLAND LAKE	674100	53 57 54.194	93 55 03.123	249.9	-.6	-18	161	176
THOMPSON	THOMPSON	714007	55 44 08.883	97 50 56.991	253.2	-.5	-8	161	176
LYNN LAKE	LYNN SAT	644000	56 51 38.898	101 03 57.780	350.5	1.0	-3	162	175
YORK FACTORY	YORK ASTRO	734020	57 00 17.744	92 18 01.596	18.4	-8.9	-11	164	175
CHURCHILL	OAK	664002	58 43 32.461	93 59 24.858	34.8	-11.7	-5	164	178
BARALZON LAKE	LYE	664031	59 57 22.999	97 53 42.680	299.5	-9.2	-7	163	178
SASKATCHEWAN									
MAPLE CREEK	WINDY	763047	49 52 22.634	109 58 13.483	843.0	12.2	-16	172	183
CUTMBERT	GULLY	763046	51 05 45.162	109 57 14.692	718.3	10.6	-16	172	183
WATROUS	WATROUS 2	703026	51 41 46.096	105 32 48.152	566.1	11.1	-11	165	178
NORTH BATTLEFORD	LIND	665007	52 44 28.343	108 25 20.117	557.1	9.8	-8	168	180
PRINCE ALBERT	RED DEER HIL	30513	53 03 23.007	105 50 28.674	531.6	9.0	-9	162	177
NORTH BATTLEFORD	COCHIN	765043	53 06 24.579	108 21 20.948	573.2	8.9	-9	179	165
MIDNIGHT LAKE	MIDNIGHT	765050	53 27 12.992	108 22 33.712	603.2	8.1	-9	179	165
TURTLE LAKE	TURTLE	765060	53 46 26.180	108 23 05.993	669.2	7.4	-9	179	166
MEADOW LAKE	MEADOW	765070	54 07 30.642	108 30 12.649	481.3	6.3	-6	179	165
GREEN LAKE	GREEN	765080	54 15 21.623	107 46 32.032	504.3	5.9	-6	178	163
DORE LAKE	WATERMEN	765090	54 36 51.233	107 48 52.191	468.4	5.5	-6	178	163
CANOE LAKE	KEELEY	665201	54 43 12.328	108 30 36.380	494.3	5.7	-9	171	177
DORE LAKE	MILL	765100	54 54 25.702	107 47 31.629	454.3	5.0	-6	177	163
FORT BLACK	CURVE	765110	55 19 02.917	107 48 24.019	442.6	4.3	-5	175	164
LAC LA RONGE	WADEN	37509	55 16 32.628	105 03 43.900	434.6	4.1	-2	161	177
ILE A LA CROSSE	INTER	765120	55 33 54.179	108 06 58.077	436.6	3.6	-5	174	164
BUFFALO	BUFFALO	765130	55 50 31.730	108 28 18.247	420.5	3.1	-5	174	164
CHURCHILL LAKE	GRAVEL	765140	56 11 22.310	108 50 32.437	458.5	2.6	-8	164	181
TURNOR LAKE	TURNOR LAKE	765150	56 28 07.310	108 41 44.193	436.3	2.2	-4	173	164
TURNOR LAKE	TURN	665200	56 44 33.027	108 46 27.199	436.8	2.1	-7	165	179
REINDEER LAKE	HUGH	99504	56 58 44.401	102 19 46.756	394.3	1.2	-1	161	174

TABLE D-I SUITE

DÉPLACEMENTS DU SYSTÈME DE RÉFÉRENCE DES COORDONNÉES PUBLIÉES DU NAD 27 À DIVERS ENDROITS AU CANADA

ENDROIT	STATION NOM	STATION NUMÉRO	COORD. PUBLIÉES DU NAD 27 LATITUDE	COORD. PUBLIÉES DU NAD 27 LONGITUDE	ALTITUDE (M)	ÉLÉVATION DU GÉOÏDE UTILISÉE (M)	DÉPLACEMENT LOCAL SYSTÈME DE RÉFÉRENCE X (M)	Y (M)	Z (M)
ALBERTA									
CARDSTON	BEAZER	23600	49 05 40.363	113 27 49.234	1474.1	11.8	-19	170	179
COMREY	SAGE	23611	49 09 18.394	110 24 03.774	988.7	12.8	-16	168	180
TABER	TABER	766251	49 52 23.671	112 20 07.776	828.6	10.4	-17	171	182
IDDESLEIGH	IDDESLEIGH	26611	50 40 03.793	111 15 36.490	867.6	10.0	-16	172	183
CALGARY	ASTRO A	636025	50 52 16.774	114 17 32.997	1262.8	11.0	-19	176	185
BROOKS	FLAT	766250	51 05 44.742	111 50 59.697	740.4	9.6	-16	172	183
JASPER	SIGNAL	736108	52 52 01.272	117 59 04.449	2129.2	13.3	-13	176	180
EDMONTON	RESERVOIR	666002	53 29 11.130	113 26 33.345	716.6	7.4	-13	174	182
TANGENT	TANGENT	54609	55 54 46.009	117 42 29.088	998.5	7.3	-18	176	180
PELICAN PORTAGE	HOUSE	666200	55 55 00.483	112 04 48.007	695.9	9.7	-10	178	181
FORT CHIPEWYAN	FORT	686004	58 43 21.642	111 09 15.309	276.9	0.2	-8	166	179
INDIAN CABIN	LAST	58608	59 54 54.406	117 02 05.547	298.4	4.9	-13	170	179
COLOMBIE-BRITANNIQUE									
VICTORIA	SPEEDY	677016	48 24 49.406	123 19 26.278	66.5	-4.0	-24	169	176
OLIVER	KOBAU ASTRO	657004	49 06 57.758	119 40 29.334	1062.9	2.3	-23	168	178
QUEEN CHARLOTTE	KLUCKSIWI 2	737030	50 34 22.453	127 09 44.378	359.9	-4.3	-26	176	180
SALMON ARM	IBA	35706	50 38 46.557	119 16 27.030	1901.4	3.9	-20	169	178
FIELD	VAUX	697001	51 17 51.377	116 32 43.706	2302.2	12.3	-16	173	179
WILLIAMS LAKE	FRASER	36704	51 58 27.210	122 13 43.874	1330.1	2.6	-22	173	181
PRINCE GEORGE	PR GEORGE NB	36717	53 54 09.037	122 42 16.967	731.1	5.8	-21	177	181
PRINCE RUPERT	OLOFIELD	15701	54 17 03.573	130 18 49.065	704.1	1.8	-24	166	173
BABINE LAKE	OLOFORT (103	737025	55 05 18.736	126 23 00.565	1560.1	7.4	-21	175	176
DAWSON CREEK	ROLLA EB	50705	55 53 52.697	120 07 18.173	692.7	8.2	-20	171	177
KINASKAN	4 HIGH	747010	57 22 40.841	130 08 29.720	1737.3	14.0	-17	162	171
FORT NELSON	NELSON 2	647000	58 51 05.849	122 30 00.175	666.6	8.6	-17	157	170
LOWER POST	CANYON	50711	59 59 02.031	128 32 58.858	866.3	12.6	-13	150	172
TERRITOIRES DU NORD-OUEST									
SELWYN LAKE	BOUSKILL	60976	60 11 16.709	104 13 02.597	526.6	-4.1	-7	165	178
CAPE BURWELL	BURWELL DOPP	749194	60 23 28.138	64 50 33.343	35.1	25.2	-32	144	175
RESOLUTION IS.	PHONE-2	749193	61 35 46.670	64 38 24.224	384.9	27.6	-15	159	173
FORT SIMPSON	SIMPSON	689004	61 44 48.953	121 14 00.904	168.5	7.4	-4	165	179
YELLOWKNIFE	YELLOWKNIFE	629102	62 28 28.863	114 26 21.415	209.2	-.6	-8	167	179
RELIANCE	RELIANCE	59928	62 45 20.248	109 04 59.978	278.8	-1.7	-6	165	178
RANKIN INLET	RANKIN DOPPL	749192	62 48 41.204	92 05 16.505	25.3	-9.8	-5	163	177
DUBAWNT LAKE	DUB	61967	62 50 44.776	101 56 14.398	311.2	-7.8	-6	165	178
WRIGLEY	WRIGLEY	759200	63 12 36.335	123 25 59.234	148.9	9.8	-3	162	178
FROBISHER BAY	FROBISHER DO	639250	63 45 28.474	68 32 30.547	26.9	22.5	-17	163	175
CORAL HARBOUR	CORAL DOPPLE	749191	64 11 12.373	83 20 36.051	91.3	1.6	-17	168	174
CAPE DORSEY	DORSEY ASTRO	749008	64 14 01.680	76 32 36.991	11.7	8.2	-16	166	174
BAKER LAKE	BAKER	639509	64 18 22.184	96 07 11.716	131.5	-8.5	-5	164	176
TOURGIS LAKE	DRAL	629002	64 54 02.973	106 05 22.650	370.4	-3.4	-6	167	175
HOTTAH LAKE	ZEBULON	639022	65 12 12.818	117 04 39.179	431.6	4.3	-6	168	179
NORMAN WELLS	NORMANWE	759201	65 16 42.166	126 47 22.557	70.1	5.6	-2	158	180
LOWER MACDOUGALL	BACK RIVER	749372	65 57 30.500	98 03 27.252	167.7	-7.3	-6	168	175
WAGER BAY	739100	739100	65 58 51.344	90 01 40.963	286.1	-2.1	-5	167	180
REPULSE	REPULSE BAY	749178	66 31 22.259	86 14 02.237	20.8	1.5	-2	166	173
CAPE DYER	DYER DOP	749187	66 39 49.337	61 34 40.890	371.3	36.4	-15	162	176
MARTIN HOUSE	MARTIN	699024	66 58 56.148	132 47 52.878	179.2	7.6	-9	150	174
HETTILLING LAKE	BASIN SH 01	569082	67 04 39.581	71 46 32.464	186.2	16.3	-15	164	177
LAC MAUNOIR	MAN	709111	67 38 10.277	124 54 41.510	597.4	6.8	-5	162	172
COPPERMINE	COPPERMINE	639045	67 49 12.525	115 06 46.877	69.8	3.3	-5	168	179
CUMBERLAND PEN	HOOPER	749523	67 51 05.469	67 59 01.845	972.3	27.5	-14	164	177
HALL BEACH	HALL SH 128	569128	68 45 56.007	81 13 44.327	9.2	9.4	-4	166	174
HALL BEACH	HALL DOPPLER	749183	68 47 27.357	81 14 11.486	6.1	9.4	-4	169	167
SHEPHERD BAY	SHEPHERD BAY	749179	68 47 36.645	93 26 17.397	44.6	0.9	-4	167	174
CAMBRIDGE BAY	VICTORIA	649032	69 06 59.067	105 03 30.777	13.5	-3.9	-6	167	178
TUKTOYAKTUK	TUK	749151	69 26 13.177	133 01 52.648	4.5	4.6	-16	150	172
PEARCE PT.	PEARCE DOPPL	749153	69 48 28.206	122 39 46.694	6.6	7.2	-12	166	176
CLYDE INLET	CAPE CHRISTI	749186	70 31 32.796	68 17 42.698	22.4	29.8	-13	165	177
SACHS HARBOUR	749154	749154	71 59 35.787	125 16 47.398	82.0	6.8	-12	173	177
STORKERSON PENN	CLOUDY SH 11	569119	72 28 19.734	106 29 27.727	162.2	5.6	-13	170	179
CROOKED LK.	MAGNETIC SH	569122	72 35 55.521	98 46 58.998	42.7	10.8	-3	169	171
ARCTIC BAY	ARCTIC BAY	749180	73 02 02.018	85 09 32.646	9.3	2[illegible]	-16	169	171
WALLACE PT.	RUSSELL	749155	73 28 08.735	115 23 52.121	28.4	6.9	-12	172	176
CROKER BAY	MORE	609835	74 32 34.339	83 35 37.116	3.1	23.8	-12	168	177
RESOLUTE BAY	RESOLUTE DOP	749159	74 43 05.364	94 59 12.503	69.5	15.7	-13	169	176
HEARNE PT.	WINTER HBR D	749162	74 48 12.328	110 30 35.794	23.2	7.8	-13	172	173
MOULD BAY	MOULD DOPPLE	749177	76 14 26.392	119 21 17.941	11.5	8.5	-11	171	178
GRISE FIORD	GRISE FIORD	749178	76 24 57.345	82 53 23.749	3.7	22.9	-11	166	178
LOUGHEED ISLAND	LOUGHEED SH	579234	77 23 42.298	103 01 21.204	33.2	11.9	-11	170	176
CORNWALL	CORNWALL DOP	749165	77 45 40.099	94 37 35.611	4.3	17.2	-11	169	176
BROCK ISLAND	BROCK (134)	619434	77 56 07.388	114 51 06.939	23.0	12.7	-10	173	166
ISACHSEN	ISACHSEN DOP	749163	78 47 00.270	103 30 52.178	27.7	15.9	-10	171	174
CAPE RUTHERFORD	ALEX FIORD	749171	78 52 51.696	73 47 05.655	12.5	26.5	-9	167	173
EUREKA SOUND	EUREKA DOP	749167	79 59 34.733	85 49 59.885	180.5	9.4	-9	173	168
ALERT PT.	ELLESMERE DO	629246	82 24 53.737	85 30 02.878	28.3	20.4	-8	169	176
CAPE RICHARDSON	ALERT	749169	82 29 50.381	62 21 23.337	91.1	24.8	-9	168	171
TERRITOIRE DU YUKON									
WHITEHORSE	SATELLITE	648000	60 43 35.035	135 09 20.035	721.7	8.6	-14	147	177
ROSS RIVER	ROSS R	738001	61 58 56.844	132 26 53.321	698.5	10.4	-14	150	175
TUNGSTEN	TUNGSTEN	738000	62 01 58.080	128 21 08.924	1288.9	10.9	-14	151	176
BEAVER CREEK	BEAVER CR A1	44007	62 27 21.763	140 51 00.293	823.2	6.1	-13	146	182
KENO HILL	GALEMAN	688100	63 55 00.998	135 23 23.238	1444.7	9.1	-17	140	175
CLINTON CREEK	MON 1266	678010	64 05 12.427	140 59 56.637	1291.7	6.9	-14	144	180
DEMPSTER	DEMPSTER	729027	65 27 30.727	138 11 51.725	558.4	7.8	-13	143	177
OLD CROW	RAMPART IBC	708001	67 21 42.300	140 56 30.195	713.8	5.6	-16	148	171
DEMARCATION PT.	BUS TOPO	708007	69 20 37.836	140 54 30.142	439.3	4.0	-9	138	173
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE									
SANDPOINT	BONNERS	3473SUS	48 48 32.989	116 19 57.833	561.7	6.8	-20	168	179
POPLAR RIVER	MADOC	2352TUS	48 48 27.982	105 19 09.230	653.1	19.5	-13	165	179

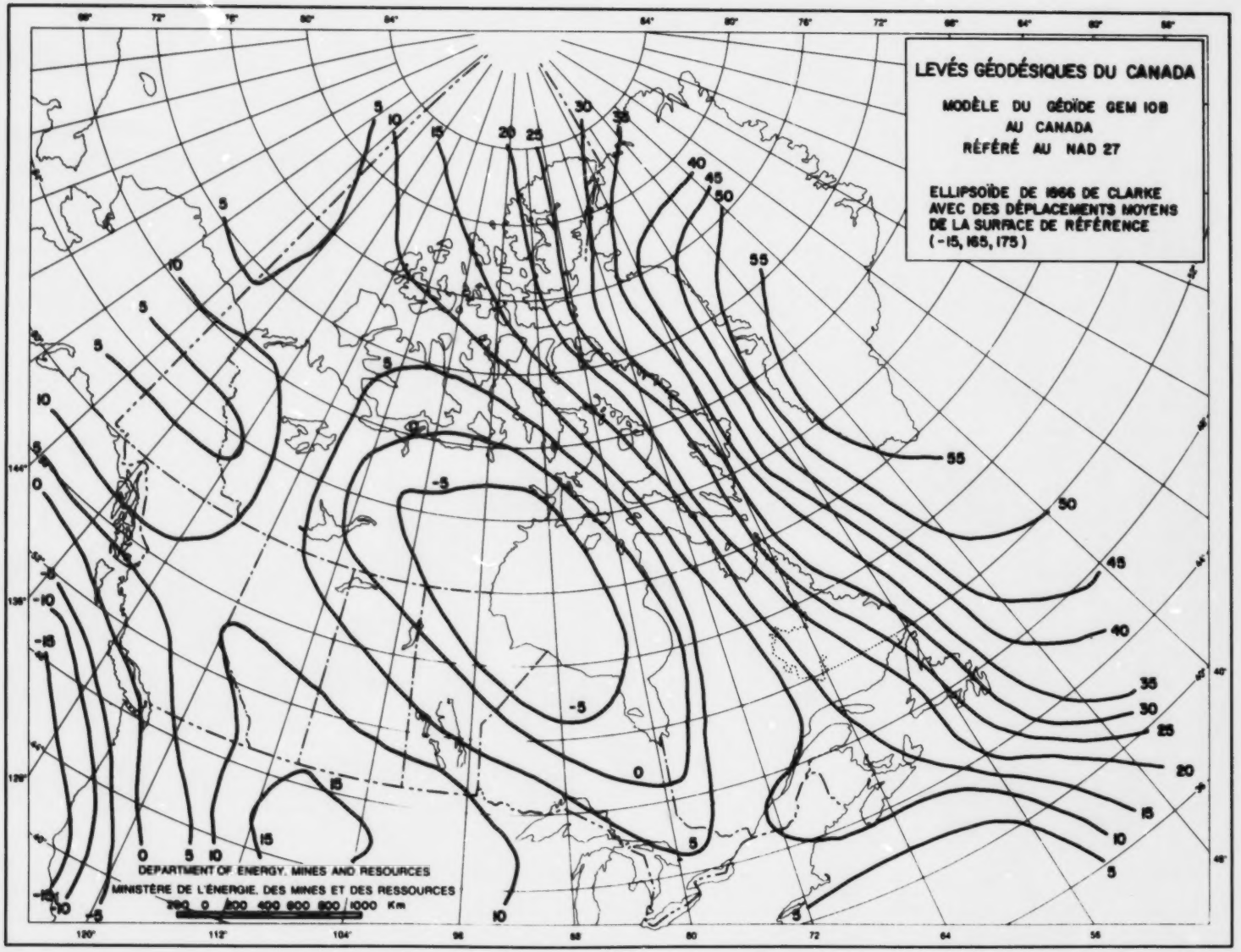


Figure D-1
Composante X du déplacement local de la surface de référence

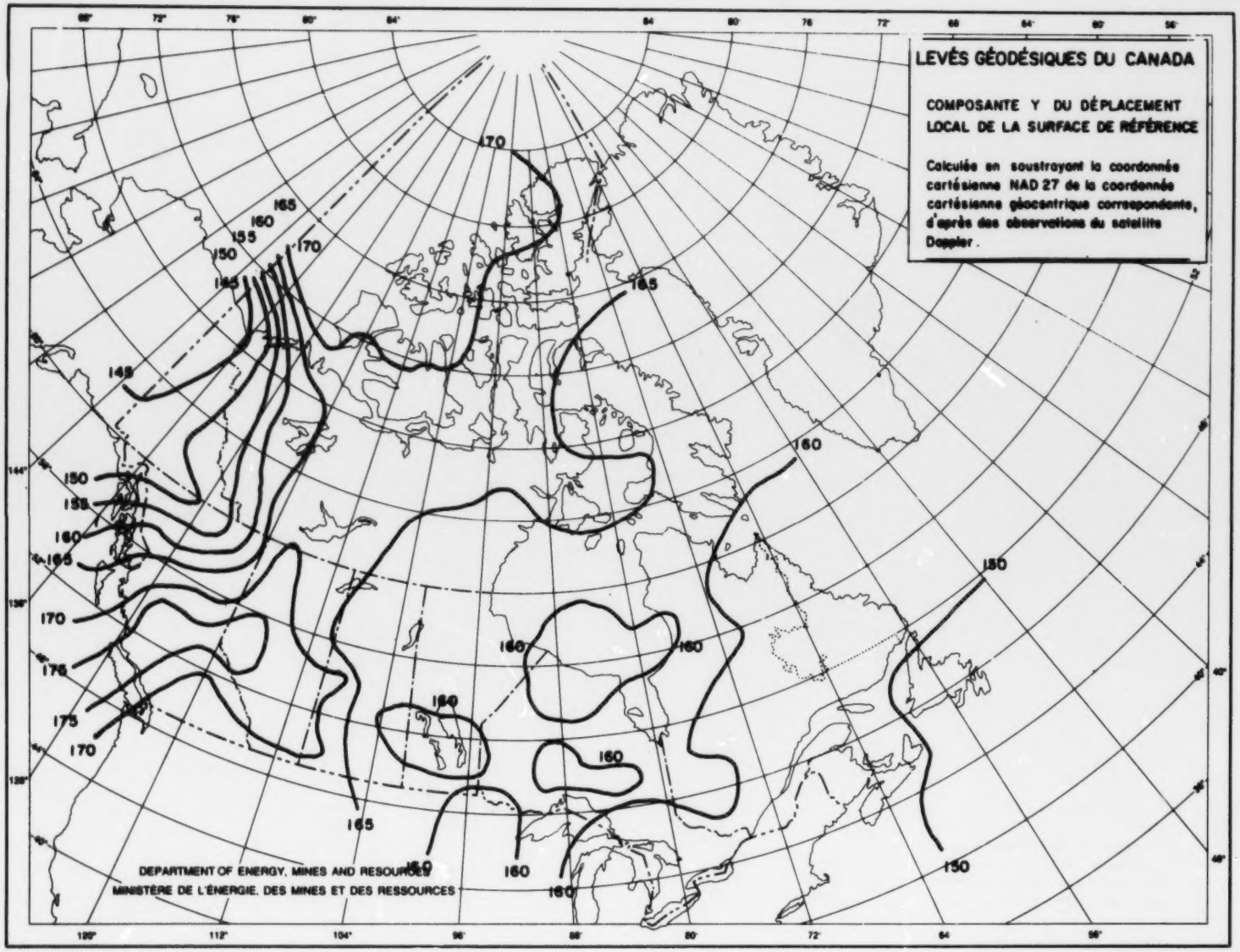


Figure D-2
Composante Y du déplacement local de la surface de référence

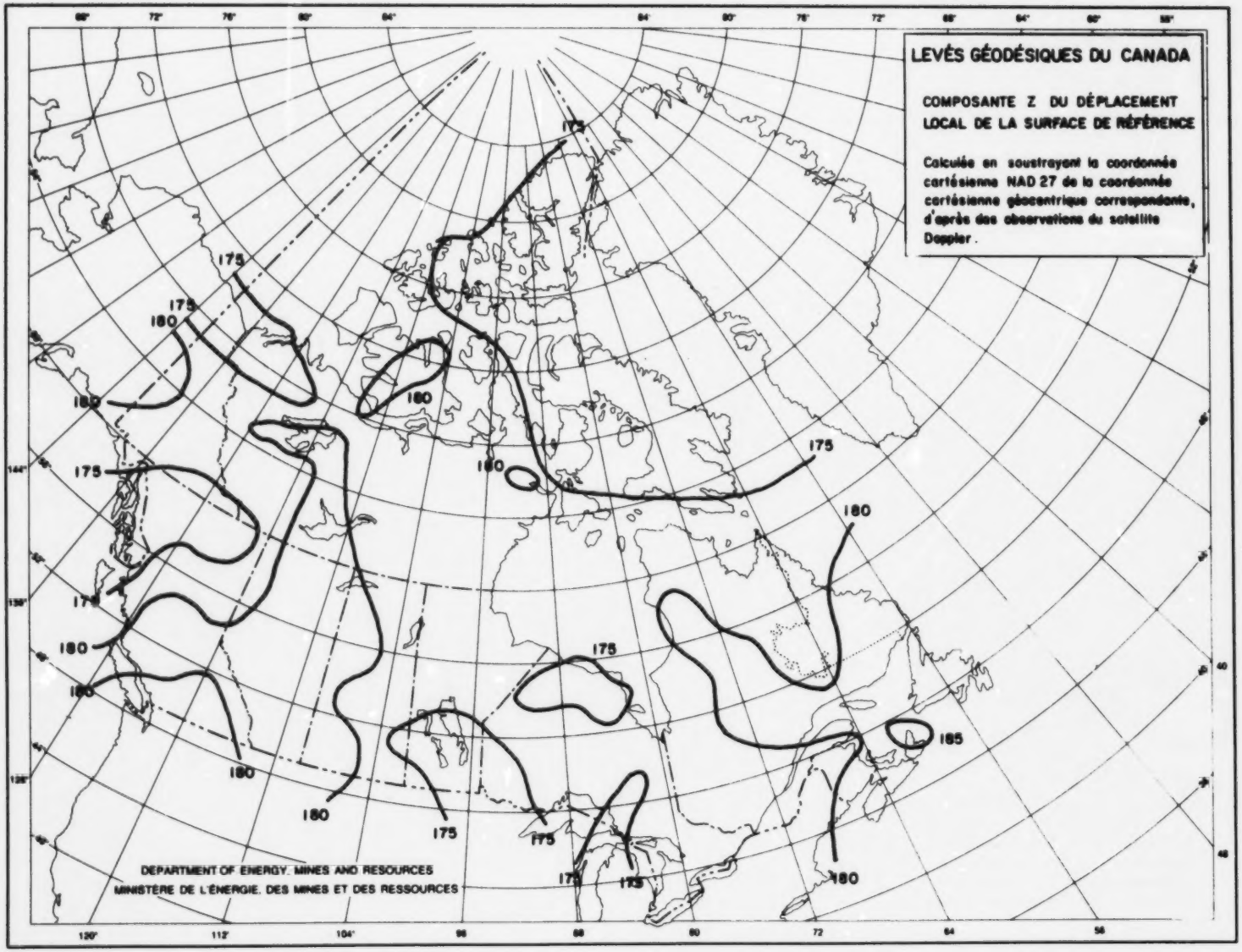


Figure D-3
Composante Z du déplacement local de la surface de référence

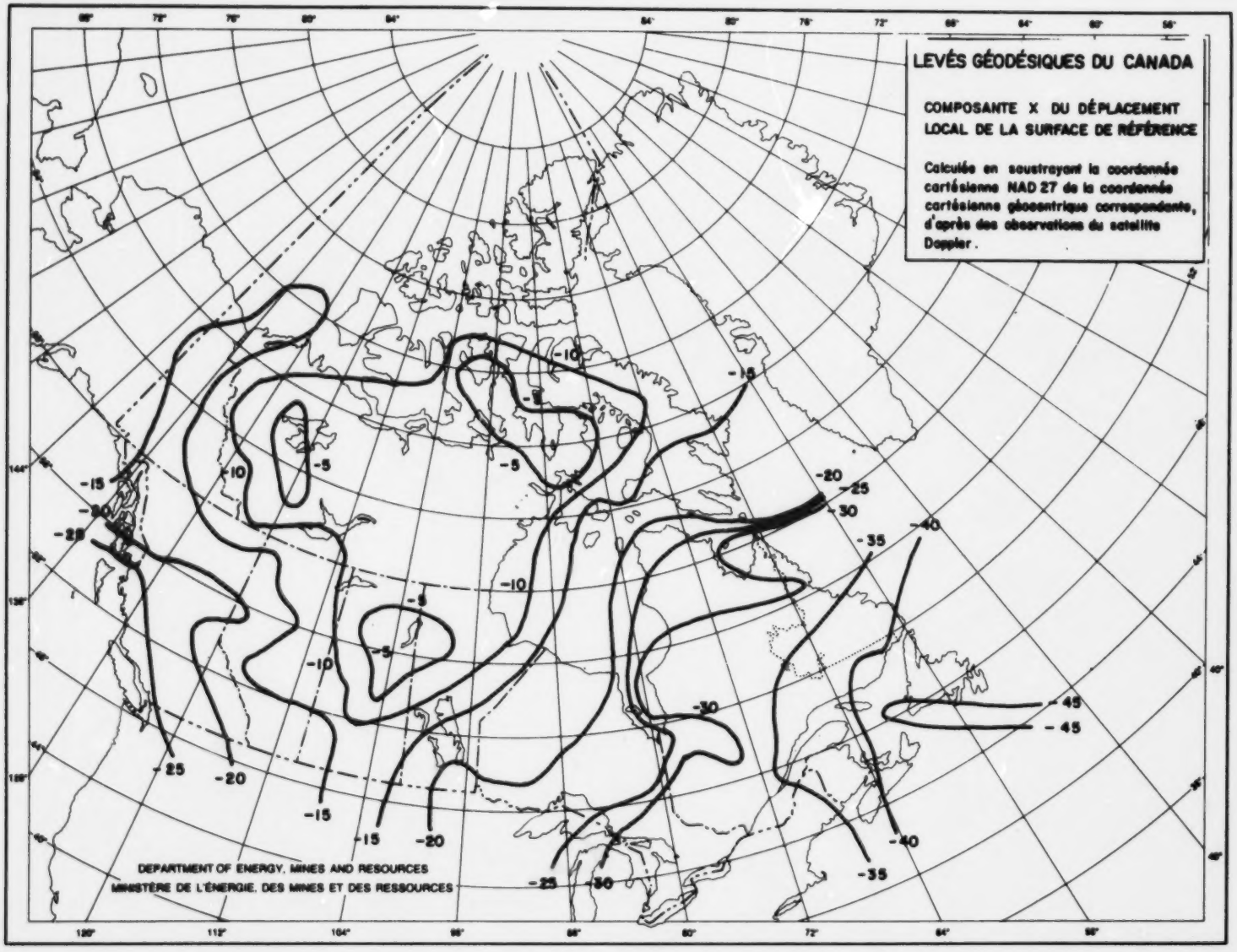


Figure D-4
Hauteur du géoïde par rapport à l'ellipsoïde du NAD 27

Appendice E

Réimpression des

Spécifications relatives aux rapports de positionnement des puits de sondage au large des côtes

publiée par

l'Administration du pétrole et du gaz

des terres du Canada

janvier 1983

Spécifications

Le sujet abordé ci-après comprend les spécifications relatives au dépôt final des rapports concernant tous les puits de sondage au large des côtes du Canada, y compris les puits forés sur les îles artificielles ou sur les îlots de glace.

Dépôt

Les rapports de positionnement des puits de sondage forés au large des côtes doivent être présentés au:

Administrateur
Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada
355, chemin River
OTTAWA (Ontario)
K1A 0E4.

Aux fins d'examen et autres, deux exemplaires doivent être expédiés au Bureau de l'Arpenteur général du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources. L'un de ces deux exemplaires sera déposé aux Archives d'arpentage des terres du Canada.

Méthode de levé

La méthode de levé utilisée doit être suffisamment précise pour rattacher les levés au plus proche canevas planimétrique sur le littoral avec au moins une précision de quatrième ordre, tel que stipulé dans les *Spécifications pour levés de contrôle et recommandations sur la construction des repères* publié en 1978.

Lorsque le puits est assez proche des côtes pour permettre l'utilisation de techniques classiques de levé terrestre, celles-ci doivent être adoptées.

La méthode utilisée doit renfermer des moyens pour vérifier les erreurs grossières soit au moyen de fermetures ou de mesures supplémentaires, soit par l'emploi d'un contrôle indépendant.

On doit décrire et marquer de façon permanente les stations littorales, au cas où il faudrait les occuper à nouveau.

Rapport

Le rapport peut être présenté sous forme de plan seul ou de plan joint à un texte décrivant la méthode de levé, les observations, les résultats finals, etc.

Le rapport doit inclure, dans le plan ou dans un texte séparé, une description générale des techniques employées, y compris celles qui peuvent servir de contrôle indépendant. Le rapport doit contenir assez de données pour se prêter à l'évaluation du système de levé (par exemple, les techniques et procédés d'étalonnage, de redressement et de compensation, et les critères de rejet). Lorsque le système utilisé a fait appel à un programme informatique (comme un programme de réduction des données obtenues par satellite doppler), il convient d'inclure une référence indiquant où se procurer le dossier technique. Le rapport doit inclure les mesures de base faites au cours du levé.

Dans le cas de levés accomplis par satellite doppler, le rapport doit inclure l'imprimé d'ordinateur des observations compensées. Si les coordonnées fournies par l'ordinateur ne correspondent pas à celles du puits ou de la borne qui figure sur le plan, il faut expliquer clairement les coordonnées à fournir. Il faut aussi indiquer les écarts types a priori, les critères de rejet, les paramètres du système de référence, le sommaire passage par passage, les écarts types dérivés, etc.

Une analyse de la précision du levé est requise de façon à indiquer comment la précision des éléments de position obtenus (azimuts et distances) entre le point nouvellement établi et les points de contrôle utilisés se conforme aux critères de précision du quatrième ordre.

Plan

Le plan doit indiquer:

- Le nom du puits y compris la section et l'unité en conformité avec le Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada
- L'étendue quadrillée en conformité avec le Règlement
- Le numéro du permis ou de la concession au besoin
- L'emplacement et les coordonnées dans le système universel Mercator transverse rapportées au système de référence géodésique nord-américain de 1927, ainsi que le numéro de zone et le méridien central:
  — du puits
  — de toutes les stations repérées et
  — des angles de l'unité qui renferme le puits
- La profondeur de l'eau à l'emplacement du puits
- Les distances horizontales mesurées, les angles ou les azimuts
- Les coordonnées géographiques d'après le système de référence géodésique nord-américain de 1927:
  — du puits
  — des bornes de contrôle (en indiquant la source des données, par exemple les Levés géodésiques du Canada, le numéro du plan C.L.S.R.)
- L'emplacement du puits par rapport aux limites de l'unité
- Un tableau des constantes et paramètres relatifs au système de levé utilisé
- La source et la valeur du décalage dans le système de référence employé pour la transformation des coordonnées au système de référence géodésique nord-américain de 1927, si on a utilisé un mode de repérage basé sur un système de référence en rapport avec le centre de gravité de la terre (par ex. le satellite Doppler ou Loran C)
- De brèves indications sur les systèmes primaires et secondaires ou sur les vérifications ou mesures supplémentaires effectuées lorsqu'on n'a utilisé qu'un seul mode de repérage
- L'échelle ou les échelles
- La flèche du Nord
- La date du levé: année, mois, jour
- La déclaration de l'arpenteur, sa signature, ses qualifications et la signature du témoin
- La certification du détenteur du permis ou du bail (facultatif)

Copie du plan type est disponible et peut servir d'exemple. Pour faciliter le classement et la reproduction du plan, règle générale, ses dimensions extérieures ne doivent pas dépasser 50 × 35 cm. S'il faut un plan plus grand, sa largeur ne doit pas dépasser 60 cm.

L.V. Brandon
Directeur général
Directeur général du
génie et du contrôle
Administration du pétrole
et du gaz des terres
du Canada

W.V. Blackie
Arpenteur général
Direction des levés et
de la cartographie
Ministère de l'Énergie,
des Mines et des
Ressources

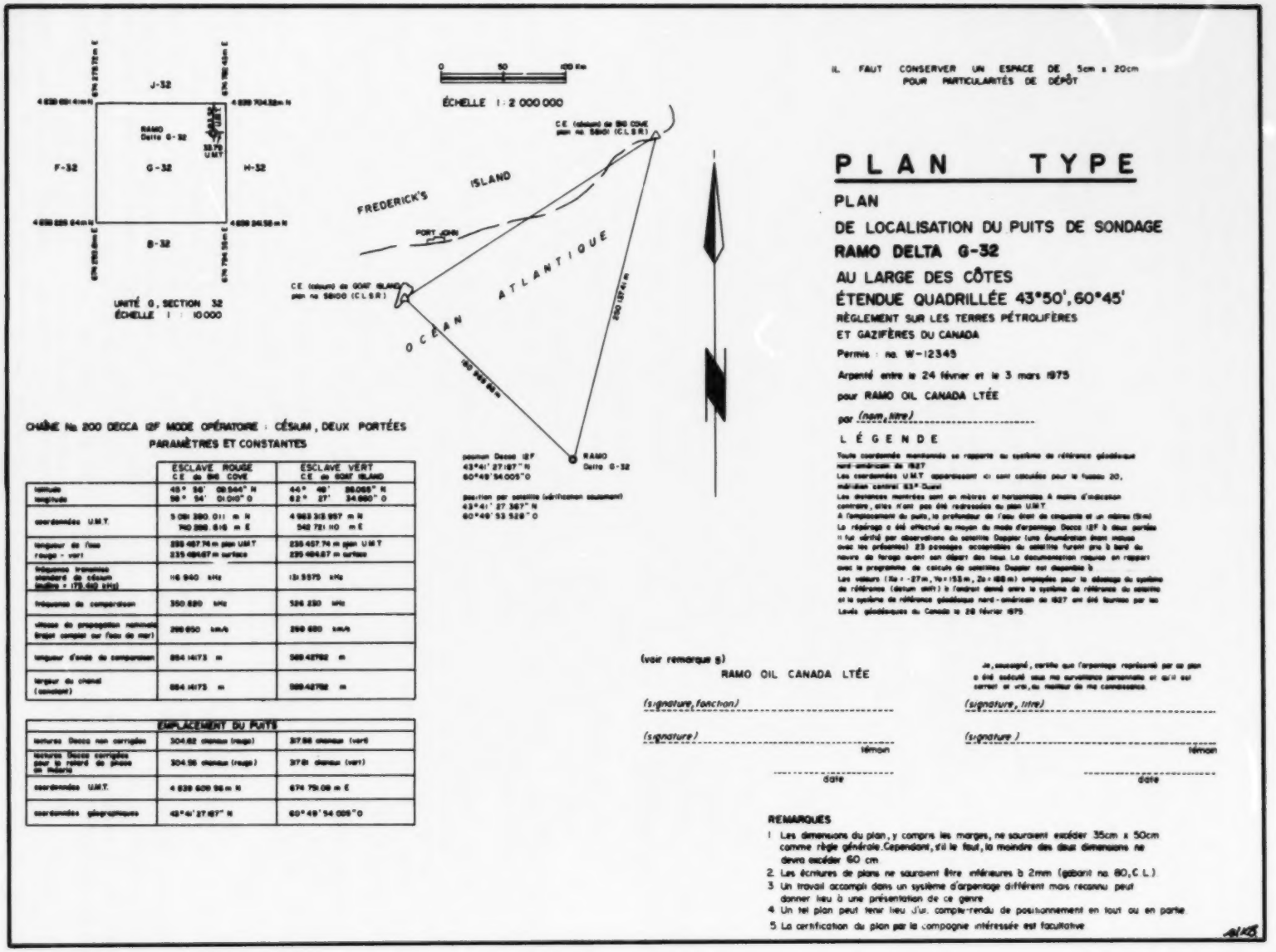


Figure E-1
Plan type de localisation d'un puits de sondage au large des côtes

Appendice F
Documents et cartes publiés par le gouvernement

Lois et règlements applicables au levé des terres sous-marines du Canada

Les arpenteurs et experts-conseils qui participent à des levés en mer dans le cadre d'études géophysiques ou de travaux de forage devraient se familiariser avec les lois et règlements d'application énumérés ci-dessous qui pourvoient au contrôle et à l'approbation des opérations pétrolières et gazières exécutées sur les terres sous-marines du Canada. Les entreprises étrangères devraient accorder une attention particulière aux lois régissant l'immigration, les douanes et l'utilisation des radio-fréquences.

Publications offertes par:
Centre d'édition du Gouvernement du Canada
Ministère des Approvisionnements et Services
Hull (Québec)
K1A 0S9

Loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques
- Règlement sur la prévention de la pollution des eaux arctiques par les navires
- Règlement sur la prévention de la pollution des eaux arctiques
- Décret sur les zones de contrôle de la sécurité de la navigation

Loi sur l'arpentage des terres du Canada

Loi sur le pétrole et le gaz du Canada
- Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada

Loi sur la marine marchande du Canada

Loi sur les douanes

Loi sur les pêcheries

Loi sur l'immigration

Loi sur les titres de biens-fonds

Loi sur les Territoires du Nord-Ouest

Loi sur la production et la conservation du pétrole et du gaz
- Règlement concernant le forage de puits de pétrole et de gaz au Canada
- Règlement sur les activités de plongée relatives au pétrole et au gaz du Canada (projet)
- Règlement sur les activités géophysiques relatives au pétrole et au gaz du Canada (projet)
- Règlement sur les structures sous-marines relatives au pétrole et au gaz du Canada (projet)
- Règlement sur les oléoducs et les gazoducs du Canada (projet)

Loi sur les concessions de terres publiques
- Règlement sur l'exploitation minière au Canada

Loi sur la radio

Loi sur les terres territoriales

Loi sur le Yukon

Conventions internationales établissant la frontière marine entre le Canada et les États-Unis

Publications offertes par:
Commission de la frontière internationale
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9

Titre	Date	Région
Convention de Washington	21 avril 1906	mer de Beaufort
Traité de Washington	11 avril 1908	entrée Dixon, détroit de Géorgie détroit Juan de Fuca
Traité de Washington	21 mai 1910	baie de Passamaquoddy
Traité de Washington	24 février 1925	chenal Grand-Manan

Publications et cartes

PUBLICATIONS SUR L'EXPLORATION ET LA MISE EN VALEUR EN MER

Offertes gratuitement par:
Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada
355, River Road, Tour "B"
Vanier (Ontario)
K1L 6S4

Exploration au large des côtes
— informations et directives à l'intention des entreprises exécutant des travaux en mer.

Rapport sur les activités au large des côtes
— compte rendu périodique des activités de l'industrie du pétrole et du gaz.

Permis d'exploration du pétrole et du gaz au large des côtes
— cartes illustrant les concessions de terres du Canada et indiquant les titulaires de permis.

Ressources sous-marines
— brochure d'intérêt général sur l'exploration en mer.

Oil and Gas Activities North of 60°
— compte rendu périodique des activités de l'industrie.

CARTES OFFICIELLES DES PERMIS D'EXPLORATION PÉTROLIÈRE ET GAZIÈRE DU CANADA AVEC INDEX

Offertes, au prix de 3 $ la carte, par:
Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada
355, River Road, Tour "B"
Vanier (Ontario)
K1L 6S4

prix d'une carte: $3.00

Numéro	Échelle	Région
100	16 milles au pouce	côte ouest
150	25 milles au pouce	côte est
151	25 milles au pouce	mer du Labrador et détroit d'Hudson
200	25 milles au pouce	baie d'Hudson
1	1:1 000 000	Île Baffin — détroit de Davis (60°N – 68°N, 57°W – 78°W)
2	1:1 000 000	bassin Foxe — Île Southampton (60°N – 68°N, 78°W – 99°W)
3	1:1 000 000	Mackenzie est (60°N – 68°N, 99°W – 120°W)
4	1:1 000 000	Mackenzie ouest (60°N – 68°N, 120°W – 141°W)
5	1:1 000 000	delta — Beaufort (68°N – 76°N, 113°W – 141°W)
6	1:1 000 000	île Victoria — île Somerset (68°N – 76°N, 83°W – 113°W)
7	1:1 000 000	île Baffin — baie Baffin (68°N – 76°N, 56°W – 83°W)
8	1:1 000 000	île Ellesmere (76°N – 84°N, 84°W – 100°W)
9	1:1 000 000	bassin Sverdrup (76°N – 84°N, 100°W – 141°W)

PUBLICATIONS SUR LES MÉTHODES DE LEVÉ

Offertes par:
Bureau des cartes du Canada
Direction des levés et de la cartographie
Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
Téléphone: (613) 998-3865

Spécifications pour levés de contrôle et conseils concernant la construction des repères, 1978
— énonce des normes de précision et recommande des méthodes pour exécuter des levés et borner des stations. SMP 1254

The Mercator and Transverse Mercator Projections
— par L.M. Sebert. Explique les principes de la projection de Mercator et expose des méthodes de calcul. SMP-1001.

A Study of Claiming and Surveying Procedures in Relation to Mineral (Hardrock) Properties in Canada
— par D.W. Thompson. Énumère les règlement en vigueur en 1970 pour toutes les terres des provinces et du Canada et discute des révisions appropriées. SMP-1033.

Publications offertes par:
Centre d'édition du Gouvernement du Canada
Ministère des Approvisionnements et Services
Hull (Québec)
K1A 0S9

Manuel d'instructions pour l'arpentage des terres du Canada, deuxième édition
— directives générales d'arpentage, établies par l'Arpenteur général du Canada. 10 $ au Canada, 12 $ dans les autres pays.

Publications offertes par:
Division des levés géodésiques
Direction des levés et de la cartographie
Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9

Guidelines and Specifications for Satellite Doppler Surveys
— par J.D. Boal, Division des levés géodésiques (en préparation).

Les publications suivantes sont des guides de programmes d'ordinateur mis au point par la Division des levés géodésiques du Canada afin de traiter les données géodésiques recueillies par satellite Doppler:

Program GEODOP, par J. Kouba et J.D. Boal, SMP-1213E.

Program PREPAR, par P. Lawnikanis, SMP-1216E.

GEODOP Utilities Program, par P. Lawnikanis, SMP-1215E.

Program PREDOP, par P. Lawnikanis, SMP-1214E.

CARTES INDIQUANT DIVERSES LIGNES DE DÉMARCATION MARINES

Offertes par:
Centre de distribution des cartes
Service hydrographique du Canada
Ottawa (Ontario)
K1G 3A6

Numéro	Échelle	Région
Ligne de démarcation des ressources naturelles entre le Groenland et le Canada, définie par la convention du 17 décembre 1973 entre le Canada et le Danemark.		
430	1:500 000	du bassin Kane à la mer de Lincoln
431	1:500 000	du cap Norton Shaw au cap McClintock
432	1:2 000 000	détroit de Davis et baie de Baffin
Zones de pêche du Canada, déterminées par décret C.P. 1971-366 et C.P. 1977-1, tel qu'amendé par C.P. 1979-184		
399	1:525 000	Zone de pêche 3, détroit de la Reine-Charlotte, détroit d'Hécate, entrée Dixon
407	1:300 000	Zone de pêche 2, baie de Fundy
408	1:300 000	Zone de pêche 1, détroit de Cabot
409	1:250 000	Zone de pêche 1, détroit de Belle-Isle
3000	1:1 250 000	Zone de pêche 5, du détroit Juan de Fuca à l'entrée Dixon Entrance
4001	1:3 500 000	Zone de pêche 4, du détroit de Maine au détroit de Belle-Isle, y compris le golfe du Saint-Laurent
5001	1:3 500 000	Zone de pêche 4, mer du Labrador, du détroit de Belle-Isle au détroit de Davis
7010	1:2 000 000	Zone de pêche 4, détroit de Davis et baie de Baffin
Mer territoriale du Canada déterminée par décret C.P. 1972-966		
391	1:525 000	île de Vancouver
392	1:525 000	du détroit de la Reine-Charlotte à l'entrée Dixon
401	1:1 000 000	côtes sud et est de la Nouvelle-Écosse
402	1:720 340	côtes sud et est de Terre-Neuve
403	1:1 000 000	côte du Labrador
412	1:300 000	de Yarmouth à Halifax
413	1:350 000	de Halifax au Cap Canso
414	1:300 000	île du Cap-Breton (côte atlantique)
415	1:250 000	du cap Ray à St-Pierre
416	1:350 000	de St-Pierre à St-Jean
417	1:350 000	de St-Jean à cap Freels
418	1:286 000	du cap Freels à White Bay
419	1:243 000	de White Bay au cap Bauld
420	1:250 000	du cap St-Charles au passage Domino
421	1:223 975	du passage Domino à l'inlet Hamilton
422	1:588 000	de l'inlet Hamilton à Nain
423	1:250 000	de Nain à la baie Saglek
424	1:250 000	de la baie Saglek aux îles Button

PUBLICATION SUR LA NOMENCLATURE DES GLACES

Offerte par:
Service de l'environnement atmosphérique
Ministère de l'Environnement
Ottawa (Ontario)
K1A 0H3

MANICE — nomenclature des glaces, classification des glaces, codes utilisés pour faire rapport sur les glaces, méthodes de reconnaissance des glaces.

PUBLICATIONS SUR LES AIDES À LA RADIONAVIGATION

Paraissent le 1er mars et le 1er septembre de chaque année.
Offertes, au prix de 75¢ la copie, par:
Centre d'édition du Gouvernement du Canada
Ministère des Approvisionnements et Services
Hull (Québec)
K1A 0S9

Aides radio à la navigation maritime (Atlantique et Grands Lacs), TP 146

Radio Aids to Marine Navigation (Pacific), TP 145

PUBLICATIONS SUR LES MARÉES CANADIENNES

Offertes par:
Bureau des cartes marines
Service hydrographique du Canada
Pêches et Océans
1675, ch. Russel, c.p. 8080
Ottawa (Ontario)
KIG 3A6

Canadian Tidal Manual
— renseignements pratiques destinés aux arpenteurs et ingénieurs ainsi qu'une explication de la théorie des calculs des marées. Ottawa, 1983.

Tables des marées, vol. I-IV, Côte de l'Atlantique et Arctique
— publication annuelle des tables des marées pour les ports et les tables à jour pour les ports et les approches.

Atlas of Tidal Currents, Bay of Fundy and Gulf of Maine
— répertoire des courants des marées déterminés à toutes les heures dépendamment des périodes des marées hautes et des marées basses à St-Jean, Nouveau-Brunswick, Ottawa, 1981.

CARTES BATHYMÉTRIQUES GÉNÉRALES DES OCÉANS (GEBCO)

Offertes par:
Bureau des cartes marines
Services hydrographiques du Canada
Pêches et Océans
1675, ch. Russell, c.p. 8080
Ottawa (Ontario)
K1G 3R6

Cartes illustrant la forme générale du fond sous-marin à l'aide de teintes dégradées et de courbes de profondeur. Projection de Mercator de 72°S à 72°N, échelle à 1:10 millions à l'équateur; projection stéréographique polaire à 64°N et S, échelle à 1:6 millions aux pôles. La Figure F-1 démontre le découpage des feuillets.

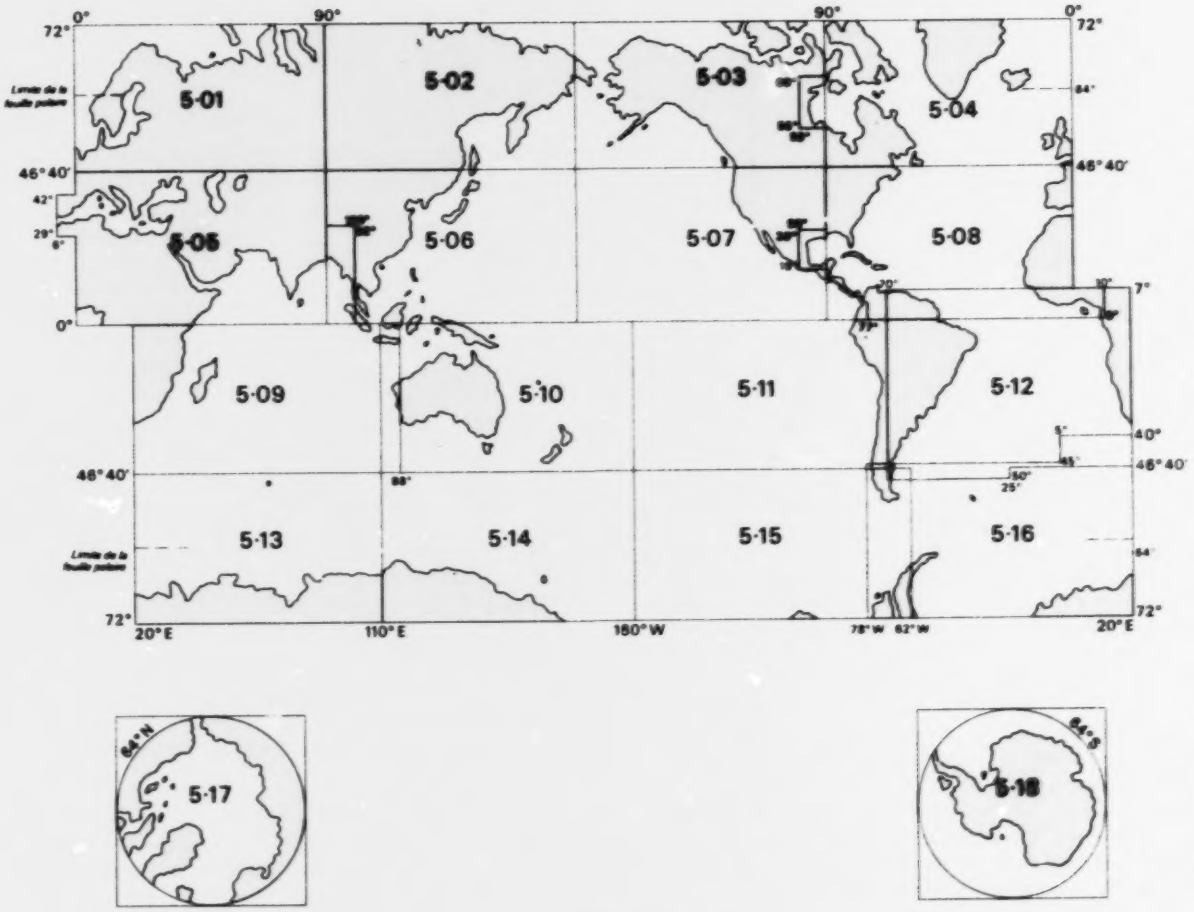


Figure F-1
Index des cartes bathymétriques générales des Océans (Cinquième édition)

CARTES OFFICIELLES DES FRONTIÈRES CANADA-AMÉRICAINES À PROXIMITÉ DU RIVAGE

Offertes par:
Commission de la frontière internationale
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9

Titre	Numéro de feuille	Échelle	Région
Frontière internationale entre la source de la rivière Ste-Croix et l'océan Atlantique	15, 16, 17, 18	1:24 000	baie de Passamaquoddy, chenal Grand-Manan
Carte conjointe de la frontière internationale entre les États-Unis et le Canada du 49° parallèle jusqu'à l'océan Pacifique		1:200 000	détroit de Géorgie, détroit Haro, détroit Juan de Fuca
Frontière internationale entre les États-Unis et le Canada, du cap Muzon au massif St-Élie	1,2	1:250 000	entrée Dixon
Frontière internationale le long 141e méridien	1	1:62 500	mer de Beaufort

Appendice G

Repères au large des côtes

Les données de l'Atelier publiées en 1970 au sujet des repères s'appliquent toujours. Elles sont répétées ci-dessous accompagnées seulement de changements mineurs, sauf dans le cas de la section largement révisée sur les balises acoustiques et les transpondeurs.

La corrosion des structures de métal est un aspect essentiel des repères au large des côtes. Comme protection à court terme, on peut effectuer un revêtement inerte ou recourir à la galvanisation et épaissir les parois pour compenser la perte de métal. La protection à long terme ne peut être assurée que par procédé cathodique, ce qui nécessite soit un approvisionnement permanent en électricité pour maintenir une différence de potentiel, ou bien un remplacement constant de l'anode.

Tours

On peut utiliser deux types de tours comme repères en milieu marin: des tours permanentes fixées à la plate-forme continentale (vie utile de 20 à 50 ans), et des tours flottantes amarrées au fond de la mer (vie utile de 2 ans).

Tours fixes

Ces tours permettent l'atterrissage d'hélicoptères et sont construites dans les eaux territoriales du Canada pour servir de phares et ailleurs dans le monde, pour la production pétrolière en mer. Ces tours pourraient très bien servir de repères permanents. Elles peuvent servir de plates-formes d'atterrissage chaque fois que les conditions météorologiques permettent les vols par hélicoptères et elles sont suffisamment stables pour répondre aux exigences impérieuses des observations astronomiques.

Le coût de la construction dépend en grande partie de la profondeur de l'eau, de l'état prévu de la mer, des conditions de formation des glaces, etc., et ne peut se justifier uniquement par la fourniture d'informations de positionnement. Il est peu probable qu'elles puissent se justifier, même si on envisage de les utiliser en partie pour des aides à la navigation ou pour des fins scientifiques.

Des plates-formes d'extraction pétrolière ont été érigées dans la mer du Nord, dans le golfe du Mexique, au large des côtes de la Californie et dans divers endroits du globe au large des côtes. Voici les données-types du coût pour 1975:

Profondeur de 30 mètres: de 3 à 5 millions de dollars;
Profondeur de 65 mètres: de 5 à 11 millions de dollars;
Profondeur de 130 mètres: de 11 à 15 millions de dollars;
Profondeur (projetée) de 250 mètres: 65 millions de dollars;

Les coûts varient avec la profondeur et d'autres aspects de conception, tels que le nombre de puits à forer (jusqu'à 48 à partir d'une plate-forme), l'environnement, l'océanographie, etc. Les plates-formes ont été conçues pour durer aussi longtemps que la vie calculée des champs pétrolifères et gazifères, normalement de 15 à 25 ans en fonction de divers facteurs techniques et autres.

Tours flottantes

Deux types de ces tours ont été construites au Canada.

- Plates-formes stables scientifiques: construites dans le lac Supérieur, dans le golfe Saint-Laurent et au large d'Halifax, dans des eaux relativement peu profondes où des plongeurs ont pu installer des mouillages. Dans le lac Supérieur les tours ont été déplacées à l'automne et replacées au printemps pour les protéger de la glace. Au large d'Halifax, la tour est demeurée pendant deux ans avant d'être détruite par une tempête. Les plates-formes ne permettent pas l'atterrissage d'hélicoptères et ne peuvent être abordées uniquement que par mer calme.
- Unité de forage pétrolier semi-submersible: les unités de forage mobiles (flottantes) au large des côtes, comme les plates-formes semi-submersibles dont il est fait mention dans les techniques de forage en eaux profondes et dans la Figure 4, se trouvent habituellement à l'emplacement d'un puits pour des périodes d'un à trois mois. Leur stabilité permet de déterminer un emplacement précis, mais les observations astronomiques précises ne seraient pas possibles sans une plate-forme gyroscopique.

Bouées

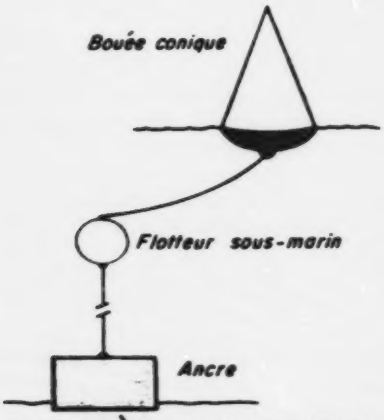
Il existe plusieurs types de bouées, chacune ayant des caractéristiques différentes. Les bouées de navigation courantes sont décrites dans une brochure publiée par le ministère des Transports (1975), "Le système canadien d'aides à la navigation". Les mouillages sont essentiellement de deux types: les mouillages de type classique, à câble mesurant de deux à trois fois la profondeur de l'eau (Figure G1 (B) (C)); et le mouillage à câble tendu, c'est-à-dire aussi court que puisse le permettre la nécessité de maintenir les bouées visibles (Figure G1(A)). Les bouées sont récupérables par mer calme et dans des conditions atmosphériques normales et elles sont facilement identifiables.

On peut obtenir une durée satisfaisante (de 2 ans ou plus) avec des mouillages par câbles mesurant environ 2 à 3 fois la profondeur de l'eau, mais la bouée se déplace bien sûr davantage et son emplacement est donc moins précis (Figure G2). On peut obtenir une plus grande précision grâce à des mouillages par câbles tendus (Figure G1 (A)), mais ce système limite la durée de la bouée à quelques mois, même par faibles courants et dans de bonnes conditions atmosphériques.

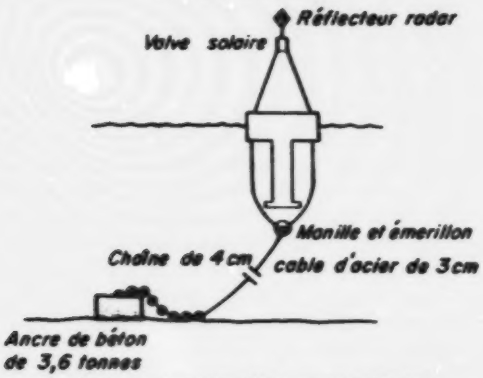
Une bouée permanente doit être remplacée dès que le mouillage montre des signes de fatigue et pour effectuer ce remplacement, il faut remonter l'équipement complet et en reposer un nouveau. Les techniques actuelles de pose des bouées rendent impossible la pose du nouvel équipement au point identique. Par conséquent, il s'agit donc d'une nouvelle borne qui nécessite de nouvelles opérations de positionnement.

Parmi les autres inconvénients de l'utilisation de bouées comme borne, on peut mentionner la dérive de leur mouillage par tempête, particulièrement s'il s'agit de bouée à mouillage

(A) SYSTÈME DE BOUÉE A CÂBLE TENDU



(B) SYSTÈME A FLOTTEUR SOUS-MARIN
(câble tendu modifié)



(C) AMARRAGE CLASSIQUE

Figure G-1
Types de bouées d'amarrage

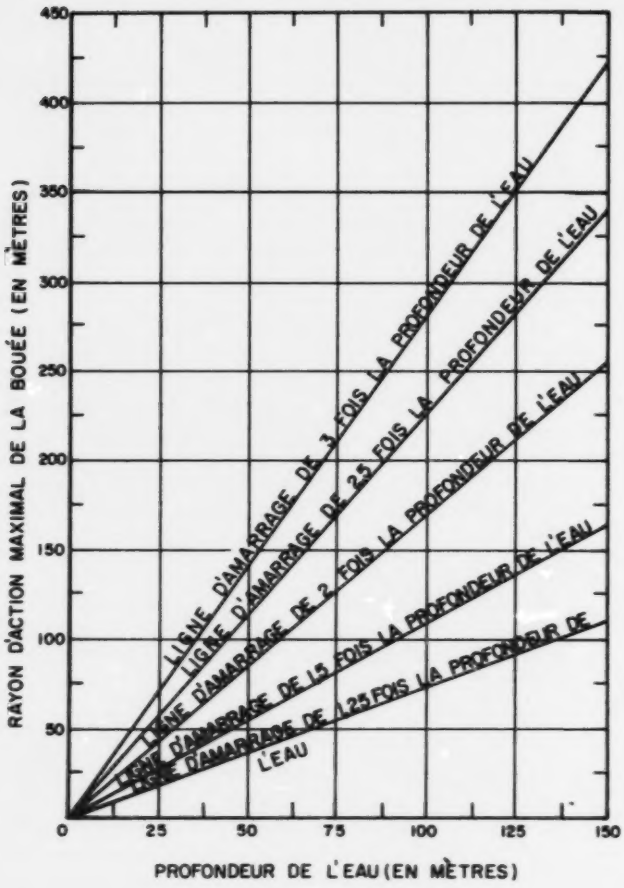


Figure G-2
Variation du rayon d'action de la bouée par rapport à la profondeur de l'eau et des différentes lignes d'amarrage

par câble tendu, déplacement qui peut ne pas être remarqué immédiatement. Une accumulation de glace peut se former sur la bouée et la faire chavirer; la bouée peut être déplacée par la glace flottante ou prise par la glace et écrasée. Elle peut également être déplacée ou même enlevée par des pêcheurs opérant dans la zone.

La plus grande profondeur à laquelle le ministère des Transports a dû effectuer un ancrage de bouées est d'environ 120 mètres. Soucieux de la vérification périodique nécessaire à tout équipement de bouées, le ministère des Transports gère un programme de remplacement annuel ou biennal et un programme de vérification plus ou moins trimestriel.

Balises acoustiques et transpondeurs

La balise acoustique est un signal sous-marin continu qui peut être détecté par des récepteurs sonars; le transpondeur répond à un signal sonar d'une fréquence donnée. La durée de la balise acoustique dépend surtout de la durée du bloc d'alimentation, tandis que le transpondeur dépend du nombre d'interrogations et de la durée de la batterie. Les transpondeurs

passifs sont couramment utilisés comme système d'émission d'ondes acoustiques pour des ensembles d'instruments marins. La durée du bloc d'alimentation de ces systèmes est généralement d'un an, au maximum de deux ans. En raison de la corrosion, il est peu probable que la durée garantie de l'ensemble du système puisse dépasser 5 à 7 ans indépendamment de la source d'alimentation. Les transpondeurs peuvent être codés pour fournir une identification précise afin d'éviter toute confusion ou ambiguïté dans un réseau.

Les distances depuis lesquelles ces dispositifs peuvent être détectés par des récepteurs sonars dépendent du bruit acoustique, mais elles sont généralement de l'ordre de 2 à 3 km. Pour atteindre une telle portée, le transpondeur doit être installé sur une bouée bien au-dessus du fond de la mer, parce que la portée et la précision sont inversement proportionnelles à la profondeur et à la proximité du transpondeur avec le fond. Le positionnement d'un navire par rapport aux transpondeurs présente des difficultés qui font l'objet de discussion dans les systèmes acoustiques de positionnement. Le bon entretien de ces instruments exige leur remplacement et le recours à des plongeurs ou à des submersibles ou même une nouvelle pose et une réinstallation, cette dernière nécessitant de nouvelles opérations de positionnement. Le ministère de la Défense nationale a indiqué que si l'usage d'un tel système était envisagé, il serait en faveur d'un type de transpondeur qui pourrait être facilement débranché.

Le coût unitaire d'un transpondeur codé avec un bloc d'alimentation d'une durée d'un an et un système d'émission depuis le fond serait de 10 000 dollars.

En résumé, ces emplacements de transpondeurs sont inabordables, d'une durée variable et exigent une augmentation substantielle du coût unitaire de l'alimentation pour obtenir une durée suffisante; ils peuvent se déplacer et ne sont pas fiables.

Les travaux de recherche sur les transpondeurs acoustiques se poursuivent, mais portent surtout sur leur utilisation comme aide de navigation ou de positionnement.

Puits

Les puits de prospection abandonnés au large des côtes ne peuvent pas servir de bornes.

Les caractéristiques souhaitables de tout repère sont la durée, la stabilité et la permanence de l'emplacement; quelques puits abandonnés répondent à ces critères; de plus, ce genre de puits ne nécessite aucun entretien.

L'identification et la possibilité de réoccupation sont deux critères essentiels pour qu'un repère puisse être utilisé comme une borne; les puits abandonnés offrent rarement ces avantages. Les méthodes actuelles d'abandon de la plupart des puits en mer ne laissent, sur le lit de la mer, aucune marque physique prouvant qu'un puits a été foré. Le tubage est habituellement sectionné de cinq à dix mètres au-dessous de la ligne de boue et tout l'équipement est recouvert. En peu de temps, le trou se comble et on ne peut détecter aucune trace du passage de l'homme.

Si on utilisait des moyens visuels, comme une caméra de télévision pour relocaliser un puits abandonné, il faudrait laisser sur le lit de la mer au moment de l'abandon une partie du matériel; cependant tout ce qui demeure au fond peut être détruit par les icebergs et les chaluts de pêche. Il faut donc mettre au point une nouvelle procédure de détection, et ceci ne semble pas réalisable à l'heure actuelle.

Pour retrouver un puits abandonné, on a envisagé la détection magnétique du tubage du puits. Cela pourrait s'effectuer par remorquage d'une tête magnétique près du lit de la mer à proximité du puits. Dans le meilleur des cas, cela ne donnerait qu'une position relative à un instant donné et on ne pourrait être sûr de la position de la tête chercheuse par rapport au puits. L'Appendice C de la première édition (1970) du rapport de l'Atelier donne une évaluation plus détaillée de cette méthode.

On considère que les méthodes visuelles et magnétiques sont fastidieuses et difficiles à utiliser; de plus, on ne peut jamais être sûr de la position de l'observateur par rapport au repère.

En résumé, les puits abandonnés sont difficiles à retrouver, ne peuvent être occupés de nouveau et dans certains cas, on ne peut les identifier; on estime donc qu'ils ne sont pas utiles comme repère de levés en mer. D'autre part, le puits d'extraction au large des côtes possède des structures permanentes, au-dessus de l'eau ou sur le lit de la mer (Figures 13 et 14). Grâce à leurs caractéristiques excellentes, ces structures peuvent être utilisées comme repère (voir la section intitulée Repères et complètements sous-marins).

Câbles

On a étudié les câbles à partir de deux points de vue: premièrement comme repères de lignes électroniquement détectables sur le lit de l'océan de telle façon que les lignes d'intersection définissaient un point; deuxièmenent, parce qu'ils fournissent une source de puissance permanente pour activer les transpondeurs au fond de la mer.

Les câbles ne sont pas appropriés comme repères de lignes, parce que leurs gaines de protection empêchent pratiquement de les détecter à moins d'une rupture. Ils sont également très sensibles au mouvement et à la rupture, en cas de dragage ou d'écrasement par les icebergs. Des icebergs près du Groenland sont demeurés sur un câble à une profondeur de 230 mètres, ont brisé le câble et ont empêché toute réparation pendant six mois.

Une protection coûteuse, il est vrai, est possible si on enfouit les câbles. En fait, les câbles enfouis n'ont jamais subi de rupture jusqu'à présent. Cependant les compagnies de pose de câbles n'ont pas encore trouvé de moyen pour récupérer les câbles enfouis.

Les câbles sont un moyen très coûteux pour alimenter en permanence les transpondeurs acoustiques.

Épaves

Chacun sait que la plate-forme continentale du Canada est jonchée d'épaves de navires de diverses tailles à diverses profondeurs. A présent, les emplacements approximatifs de la plupart de ces épaves sont des informations militaires cotées. On estime que cette limitation sécuritaire pourrait être levée, dans certains cas, si on pouvait utiliser ces épaves comme bornes-repères de limites.

De prime abord, on pourrait croire que ces épaves coulées seraient des repères idéaux, si elles étaient situées près des points qu'on veut marquer, car leur localisation ne nécessiterait aucune dépense de construction ni d'entretien.

Dans beaucoup de cas, ces localisations approximatives d'épaves proviennent d'informations douteuses, telles que les dernières positions à l'estime transmises par le navire avant qu'il coule; souvent, le navire s'est définitivement posé à un endroit éloigné de la position qu'il a signalée. Par conséquent, il est

vraisemblable qu'il faudrait entreprendre des recherches approfondies avec un équipement acoustique spécial pour localiser la position réelle d'une épave donnée. Selon toute probabilité, cet équipement acoustique devrait être utilisé chaque fois qu'il faudrait retrouver un repère, bien que les coordonnées de l'épave déterminées précédemment faciliteraient de telles recherches.

Les navires coulés peuvent dériver en raison des courants sous-marins, être recouverts par la vase et se briser: les navires de taille importante et relativement bien préservés pourraient donc être classés comme épaves suffisamment permanentes pour servir de repère.

Bien que les épaves aient parfois servi d'aide de positionnement au cours de levés de prospection minière au large des côtes (on a utilisé par exemple des épaves pour vérifier le déplacement d'un transpondeur), il vaut mieux renoncer à utiliser les navires coulés en guise de repère de levés.

Anomalies éventuelles du champ magnétique

Le Service des sciences et levés océaniques (ministère des Pêches et Océans) enregistre en permanence la mesure des champs gravimétriques et magnétiques terrestres tout en effectuant des levés bathymétriques au large des côtes. Ces mesures présentées en courbes qui démontrent leur variabilité par rapport à un élément origine au niveau de la mer sont préparées de la même façon que les cartes bathymétriques.

Champ magnétique

Les phénomènes qui influent sur la précision et la fidélité des mesures magnétométriques peuvent se diviser en trois grandes classes: les erreurs des instruments qui sont probablement inférieures à cinq nanoteslas, les changements plus ou moins prévisibles du champ magnétique qui varient avec le temps et sont généralement de l'ordre de 25 nanoteslas, et les perturbations éphémères imprévisibles appelées orages magnétiques (qui peuvent dépasser plusieurs centaines de nanoteslas).

En raison des nombreuses sources d'erreur, la position exacte d'un point, même d'après des anomalies magnétiques de haute fréquence et de grande amplitude, n'est pas suffisamment bien définie pour servir de repères de levés.

La gravité

La prévision et la fidélité des mesures gravimétriques relevées par bateaux dépendent des instruments et de l'environnement. A présent, la précision des mesures gravimétriques effectuées par bateaux est d'environ 2 à 3 milligals dans le cas d'un levé soigneusement vérifié et effectué par bonne navigation.

Étant donné que les anomalies gravimétriques ont généralement un gradient inférieur à quelques milligals par kilomètre, les courbes des anomalies ne sont pas suffisamment déterminantes pour servir de repères ou de bornes.

Détails physiques

Le Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada mentionne l'utilisation d'un détail topographique identifiable sur une carte publiée par le gouvernement du Canada ou en son nom. Les détails topographiques submergés au large des côtes figurent en général uniquement sur les cartes marines. Les cartes ont été conçues comme des aides à la navigation maritime et, en raison des variables inhérentes à l'utilisation de ces cartes et des besoins, il se peut que deux cartes de la même zone n'aient pas le même aspect ni la même portée.

Le relief du fond de la mer est présenté de manière claire et pratique pour permettre d'identifier les dangers et détails qui servent d'aide, lors de navigation par échosondeur ou par un autre appareil sonar. Les lignes de profondeur sont largement espacées en eau profonde, mais sont plus rapprochées sur la plate-forme continentale et les hauts-fonds. Les courbes bathymétriques servent à préciser les détails utiles à la navigation.

Les détails physiques du fond de la mer ne semblent pas utiles comme bornes, mais peuvent servir de repères lorsqu'il faut relocaliser et retrouver des puits abandonnés, des épaves, des réflecteurs acoustiques et d'autres appareils. Ces détails se divisent en deux catégories:

Les détails du fond comprennent les hauts-fonds, les bancs, les canyons, etc., qui ont été identifiés au cours des levés hydrographiques et figurent sur les cartes marines; des abréviations appropriées signalent des détails du fond de la mer.

Les détails identifiables sous-jacents aux fonds sont habituellement des formations rocheuses ou, dans certains cas, des épaves recouvertes d'une couche de sédiment. Ces détails sont fréquemment détectés au cours de levés hydrographiques, car les signaux de l'échosondeur pénètrent dans les sédiments, sont réfléchis jusqu'au navire et enregistrés de la même façon que le fond de la mer; en général, ces détails sous-jacents n'apparaissent pas sur les cartes marines.

Réflecteurs acoustiques

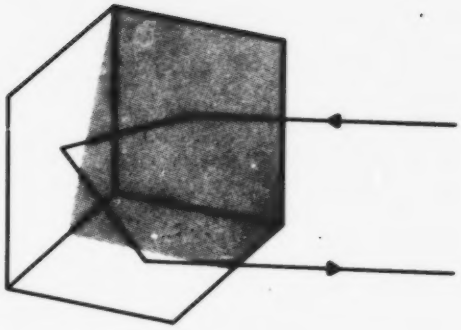
Sur les plateaux continentaux, les systèmes de positionnement sous-marin qui utilisent un réseau de réflecteurs peuvent être très utiles pour localiser un navire. Les distances mesurées jusqu'au réflecteur acoustique sont sujettes à divers facteurs. La qualité du matériel d'émission et de réception; le milieu dans lequel s'effectue la transmission qui influe sur la vitesse du son; la fréquence du signal et les caractéristiques de la cible; enfin, la vitesse du navire et sa position par rapport à la cible.

Pour détecter une cible de dimension normale, l'appareil émetteur-récepteur doit être très directionnel et fonctionner à de hautes fréquences. On obtient un rapport signal/bruit plus élevé. L'atténuation monte avec la fréquence et réduit la distance de fonctionnement. Pour évaluer des distances par écho, on utilise en général des fréquences de 5 à 40 kHz.

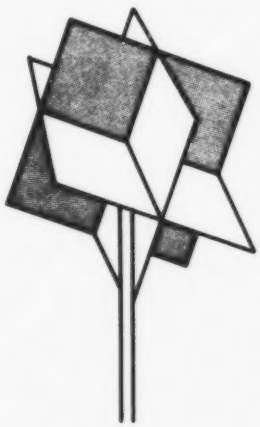
Le milieu de transmission, l'eau de mer dans le cas précis, a fait l'objet d'études approfondies pour évaleur ses effets sur la propagation de signaux acoustiques sous-marins. Ces informations sont facilement disponibles et ont fait l'objet de longues discussions dans diverses publications (Ingham 1974). Les conditions varient d'un lieu à un autre et, pour mesurer précisément une distance, il faut effectuer un étalonnage précis pour chaque réseau de réflecteurs afin de déterminer les divers paramètres qui influent sur la propagation.

L'intensité du signal réfléchi dépend de la dimension, de la forme, de l'orientation et de la position de la cible, en rapport avec le signal transmis, et de la distance par rapport à la source du signal. L'association de tous ces facteurs détermine le facteur de réflexion de la cible.

Les facteurs de réflexion des cibles cylindriques varient avec leur orientation. Les sphères font de bonnes cibles car leur



(A) RÉFLECTEUR TRIÈDRE



(B) RÉFLECTEUR TRIPLAN

Figure G-3
Types de réflecteurs acoustiques

facteur de réflexion est relativement indépendant de l'orientation. Les sphères très compressibles, telles que des bulles de gaz ont un facteur de réflexion considérablement accru.

On obtient des facteurs de réflexion très élevés grâce à des surfaces planes perpendiculaires à la trajectoire du signal acoustique. Les réflecteurs trièdres et les réflecteurs triplans (Figure G-3 (A) (B)) donnent un signal réfléchi presque constant, indépendamment de la direction d'où provient le signal. On augmente considérablement le facteur de réflexion de la cible en construisant la cible triplan de façon que ses plaques réfléchissantes contiennent de l'air.

La cible de type triplan a subi une série d'essais pour déterminer les distances de fonctionnement comparativement à d'autres cibles de diverses formes et elle semble être le type le plus efficace, compte tenu de sa dimension. La plupart des cibles de ce type utilisent des surfaces planes de deux mètres de côté et elles peuvent être détectées à des distances atteignant 1000 mètres. Le coût de ces réflecteurs, y compris l'équipement d'ancrage, est supérieur à 2000 dollars.

Afin de rendre le signal de cible distinct des bruits de fond, la cible doit être éloignée du fond de la mer (habituellement d'environ sept mètres). Ceci nécessite des bouées, des ancres, et des câbles et entraîne donc les inconvénients qui leur sont propres.

Il ne fait aucun doute, semble-t-il, qu'un système de réflecteur précisément positionné près du fond de l'océan, pourrait servir au positionnement d'un navire de surface ou sous-marin. Les problèmes qui s'y rattachent sont semblables à plusieurs égards à ceux des bouées et, de plus, on ne peut localiser la cible visuellement.

L'entretien du système, après son installation, serait semblable à celui des bouées et transpondeurs. Il faudrait effectuer une série de vérifications périodiques de la stabilité de leurs emplacements, et déterminer à nouveau leur position après l'entretien. L'intensité de réflexion de la cible diminuerait (dans une certaine mesure) en raison de dépôt marin sur les surfaces réfléchissantes, de la présence d'autres dépôts et de réactions chimiques.

Le système dépendrait de la durée limitée de l'équipement d'ancrage (câbles, bouées, etc.) qui serait donc vulnérable aux chaluts de pêche. Ces inconvénients, ajoutés à la difficulté de déterminer précisément leur position, donnent une idée des problèmes qui, sans pour autant être insurmontables, nécessiteraient des études très approfondies.

Appendice H

Les lignes directrices concernant les relevés de pipelines sous-marins

Établies sous l'égide de l'Atelier 1982 sur le levé des fonds marins pour la mise en valeur des ressources minérales

D'après les quelques études qui ont été faites, on ne connaît pas de pays qui réglementent de façon rigoureuse les relevés de pipelines sous-marins. Les présentes lignes directrices ont pour but d'aider les exploitants et leurs arpenteurs à satisfaire les conditions assez générales exigées par le Canada en ce qui concerne ce type de levé.

Exigences relatives aux relevés de pipelines sous-marins

Pour que soit approuvée la construction d'un pipeline, les paragraphes 23(f), (i), (j) et (t) du Règlement de 1981 sur les oléoducs et les gazoducs du Canada disposent que les entreprises doivent soumettre des dessins montrant: l'emplacement projeté du pipeline; des études topographiques, hydrographiques et géotechniques régionales pour un couloir de 1 200 mètres de largeur centré sur le pipeline; un profil du tracé; et une description du système de positionnement devant être utilisé au cours de la construction. Les levés doivent être réalisés avec beaucoup de soin. Pour le levé de reconnaissance, il suffit que le système de positionnement ait une bonne fidélité et que le levé soit cohérent. Cependant, si le système a, en plus, une bonne précision, il doit être possible de retourner à n'importe quel point relevé non seulement avec le même système de positionnement, mais aussi avec n'importe quel autre système de précision. Il est ainsi beaucoup plus facile de mettre le levé en corrélation avec ceux des phases ultérieures du travail qui nécessitent une grande précision, c'est-à-dire les levés de détail prévus par l'article 24, le levé de construction, les levés d'inspection exigés par les paragraphes 112(2) et (3) et les levés d'après-construction ou d'entretien. En vertu de l'article 126, il faut aussi installer des dispositifs qui facilitent le repérage du pipeline. L'article 22 du Règlement sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada exige pour sa part que soient établis, avant la construction, un plan provisoire de tout travail destiné à la collecte ou au transport du pétrole et du gaz et, dans les six mois suivant la fin des travaux, un plan définitif.

Techniques de relevé des pipleines sous-marins

1. *Positionnement* — maintenir le navire hydrographique (ou les détecteurs) sur une trajectoire prédéterminée. La précision doit être suffisante pour permettre aux points d'être retracés ou relocalisés ultérieurement.
2. *Bathymétrie* — déterminer la forme du lit de la mer le long de la ligne de levé, au moyen d'un échosondeur.
3. *Sonar latéral* — capter des signaux sonar réfléchis qui produisent une image du fond marin, de manière à repérer des objets tels que affleurements, épaves et autres qui pourraient faire obstacle à la construction du pipeline.
4. *Établissement de profils du sous-sol marin par prospection sismique peu profonde* — évaluer la dureté et l'épaisseur relatives des couches du fond marin, et la facilité avec laquelle on peut y creuser.
5. *Échantillonnage et photographie du fond marin* — confirmer l'interprétation des levés exécutés par sonar latéral et profileur de sous-sol marin. Ces travaux se font uniquement à des intervalles réguliers ou à des endroits choisis.
6. *Levés au magnétomètre* — une des méthodes permettant de repérer des objets métalliques pouvant constituer un danger, tels que câbles, pipelines et épaves.
7. *Études sur les courants et la qualité de l'eau* — exécutées au besoin pour l'élaboration des critères de conception et d'installation.

Les relevés de pipelines sous-marins emploient ces techniques en totalité ou en partie et sont normalement exécutés en plusieurs étapes successives: 1) levé de reconnaissance, 2) levé de détail, 3) levé de construction et 4) levé d'après-construction ou d'inspection. Après chacune des étapes, des plans et des rapports doivent être élaborés et certifiés à la satisfaction de l'exploitant. Les plans du levé doivent indiquer la méthode de positionnement, la surface de référence et la projection utilisées, le mécanisme de vérification et le degré de précision obtenu.

Exigences relatives à chacune des phases du relevé de pipeline sous-marin

1. *Levé de reconnaissance*
   Cette étude préliminaire a pour but d'explorer une zone du fond marin qui se prête à la construction d'un pipeline entre deux points terminaux. L'entrepreneur doit commencer par des recherches approfondies auprès de nombreux et divers organismes publics et privés, afin d'avoir à sa disposition autant de données que possible sur le tracé envisagé. Il doit aussi examiner des cartes hydrographiques et d'autres données disponibles, pour vérifier l'emplacement et l'état des structures en place, les gradients et les autres irrégularités du fond marin susceptibles d'influer sur la construction du pipeline.

   Par la suite, il doit déterminer plusieurs tracés qui pourraient constituer une liaison satisfaisante entre des terminaux et, le long de ces tracés, exécuter des levés géotechniques. Dans cette phase du travail, il faudra utiliser les techniques décrites ci-dessus en totalité ou en partie.

   Il est permis de combiner ces techniques pour se limiter à un seul passage ou obtenir une couverture à faible densité. Si des conditions peu favorables se présentent le long du tracé préliminaire, il faut exécuter des vérifications latérales ou des observations transversales pour choisir les déviations les plus appropriées. Si l'on utilise un

positionnement de précision durant tout le travail préliminaire, on pourra facilement, et en toute confiance, combiner toutes les données obtenues pour déterminer les tracés pouvant être soumis à des études plus détaillées.

2. *Levé de détail*
Ici, on emploie les mêmes techniques que dans le levé de reconnaissance, sauf que la densité des données doit être beaucoup plus grande étant donné qu'il faut une plus grande résolution. Il faut lever des séries de lignes parallèles de manière à couvrir tout le couloir de 1 200 m exigé. Les données recueillies pendant cette phase du travail servent à déterminer le tracé optimal et sont également utilisées dans la conception finale du pipeline.

3. *Levé de construction*
Les systèmes de positionnement utilisés doivent être suffisamment précis pour que le pipeline soit installé à l'intérieur du couloir dont le levé a déjà été fait. Le navire hydrographique doit être équipé d'un sonar latéral, d'une sonde, d'un magnétomètre et de chambres de prise de vue sous-marines (chambres stationnaires et caméras de télévision). Les chambres de prise de vue peuvent être nécessaires pour recueillir des renseignements supplémentaires à proximité des structures étrangères, des pipelines et des câbles.

4. *Levés d'inspection*
Dans le cas de ces levés, le système de positionnement doit permettre de déterminer la position du navire hydrographique avec au moins une précision de troisième ordre et de la rapporter à des repères géodésiques positionnés avec une précision égale ou supérieure au troisième ordre. On prévoit qu'il ne sera pas nécessaire de relever la position du navire avec une précision supérieure à 10 m (écart type). En outre, les erreurs dues à l'enregistrement des données et au positionnement des détecteurs (par rapport au navire) dans les observations du magnétomètre, de la sonde, du sonar latéral, du profileur de sous-sol marin et des chambres de prise de vues doivent être prises en considération. Tous les efforts doivent être faits pour que l'erreur de la position du pipeline par rapport aux repères géodésiques utilisés ne dépasse pas 25 m (écart type).

Il est possible d'utiliser un sonar latéral et un profileur de sous-sol marin pour déterminer la position définitive du pipeline (et de la tranchée) par rapport au canevas, sa position par rapport à d'autres structures, l'épaisseur de la couverture et les conditions du fond marin. Le magnétomètre peut confirmer la position du pipeline et repérer tout débris métallique qui a été abandonné sur le fond marin. Un submersible équipé de caméras de télévision peut fournir l'information nécessaire aux travaux d'inspection. Les données recueillies doivent être compilées et présentées sur des plans qu'il faut soumettre à l'Arpenteur général et à l'Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada et qui seront éventuellement portées à la connaissance d'autres organismes gouvernementaux.

L'échelle des plans est fonction de la densité des données qui apparaissent sur les plans. Ceux-ci doivent contenir tous les points de canevas utilisés, les points adjacents, les plates-formes, les couloirs de pipeline, les distances entre points de déviation et les points de rattachement. Il faut présenter sous forme de tableau les coordonnées des points de déviation et des points intermédiaires ainsi que les profondeurs d'eau et indiquer clairement la surface de référence à laquelle ces coordonnées sont rapportées. Le plan doit également contenir une description du système de positionnement, rendre compte des vérifications qui ont été faites pour s'assurer de la fiabilité des données et indiquer la précision obtenue.

Les cadastres

Lorsqu'un pipeline est construit sur des terres du Canada, à l'intérieur du continent, l'exploitant du pipeline doit obtenir une servitude de passage; l'emprise est levée et repérée par un arpenteur des terres du Canada, en vertu de la Loi sur l'arpentage des terres du Canada et en conformité de la Loi sur les concessions de terres publiques. Le plan d'arpentage de l'emprise est versé dans les archives d'arpentage des terres du Canada. La servitude assure à l'exploitatnt un certain contrôle sur le couloir du pipeline et restreint l'accès à ce couloir. En même temps, le plan d'arpentage fait connaître à d'autres personnes l'emplacement de l'emprise.

Dans le projet de règlement sur les pipelines sous-marins, aucune disposition de ce genre n'est prévue. Si une servitude était accordée en mer, il ne serait généralement pas possible de repérer l'emprise. C'est probablement le pipeline comme tel qui servirait de repère. La position du pipeline serait définie par les coordonnées U.T.M. ou géographiques, rapportées à une surface de référence déterminée, de tous les points de déviation et points intermédiaires séparés par une distance minimale déterminée.

Appendice I

Bibliographie — Optiques historiques et subjectives

Adams, J.H., Folkenberg, W.H., Lockhart, J.T., McGladrey, N., An Overview of Offshore Rig Positioning in Canadian Waters, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, 1981.

Bolton, M., Hydrographic Surveys in the Beaufort Sea, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Bolton, Michael, Hydrographic Operations in the Beaufort Sea, *Le géomètre canadien*, vol. 25, n° 2, juin 1971.

Cox, D.G. et Bishop, B.R., Island Mapping and Real Time Surveying Data Base, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, 1981.

Dawson, D.K.F., The Surveyor in the Offshore, *ALS News*, Alberta Land Surveyors' Association, vol. X-2, 1981.

Dawson, James, Ancient Charts and Modern Mariners, *Marine Geodesy*, vol. 4, n° 2, 1980.

Douglas, G.R., Hydrographic Research in the Canadian Arctic, *Actes de la Première conférence technique internationale sur l'hydrographie*, Ottawa, 1979, publié dans *Le géomètre canadien*, vol. 33, n° 4, 1979.

Gore, Rick, Striking It Rich in the North Sea, *National Geographic*, vol. 151, n° 4, 1977.

Haslam, R., Adm. D.W., Address by Keynote Speaker, *Actes de la 16e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Burlington, 1977.

Haslam R., Adm. D.W., The Surveying Requirements for Deep-Draught Routes, *Actes de la Première conférence technique internationale sur l'hydrographie*, Ottawa, 1979, publié dans *Le géomètre canadien*, vol. 33, n° 4, 1979.

Keating, Bern, *North for Oil* — Manhattan Makes the Historic Northwest Passage, *National Geographic*, vol. 137, n° 3, 1970.

King-Hele, D.G., The Shape of the Earth, *Scientific American*, October, 1967.

MacPhee, S.B., National Hydrographic Surveying and Charting Program – Status and Techniques, *Actes du Colloquium III Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Marden, Luis, The Continental Shelf, *National Geographic*, vol. 153, n° 4, 1978.

McTaggart-Cowan, Dr. P.D., Ships, Charts and the Environment, *Actes de la 11e conférence canadienne sur l'hydrographie* vol. 1, Ottawa, 1972.

National Academy of Sciences, *North American Datum*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Rockville, Maryland, 1971.

O'Rourke, J. Cameron, Canada's Research and Development Imperatives — Ice Covered Waters, *Actes de la Première conférence technique internationale sur l'hydrographie*, Ottawa, 1979.

Ritchie, R., Adm. G.S., Technological Advances and the Sea Surveyor, *Le géomètre canadien*, vol. 27, n° 4, 1973, et *International Hydrographic Review*, vol. 51, n° 1, 1974.

Ross, D.I. et T.A. Irvine, Hydrography and the Offshore Industry in Canada in the 1980's, *Actes de la 19e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Halifax, 1980.

Thomson, D.W., Wells, D.E., Falkenberg, W.N., Hydrographic Surveying, *Surveying and Engineering*, Publication de l'Université de Calgary n° 10002, 1980.

Van Wealde, R. Adm. H.H., Deep Draught Surveys in the Southern North Sea, *International Hydrographic Review*, vol. 50, n° 1, Monaco, 1973.

Bibliographie — Législatif

Clark, Lorne S., Impact of the Law of the Sea Conference on Offshore Resources, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Lewis, D.E. et A.R. Thompson, *Canadian Oil and Gas (Law)*, Butterworth, Toronto, 8 vol., 1955.

Nicholson, Norman L., *The Boundaries of the Canadian Confederation*, (biblothèque de Carleton n° 115) MacMillan of Canada, Toronto, 1979.

Raymond, G., New Canada Oil and Gas Regulations as They Affect Surveys, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

U.K. Offshore Operators Association, *Procedures Guide*, London (1982).

Wright, R.J. éd., *Canadian Mining Law*, Butterworth, Toronto, 6 vol., 1975.

Bibliographie — Géodésie et compensations

Army Map Service, *Map of Geoid Contours in North America*, Feuillet 2, Washington, 1967.

Babbage, G. et McLellan, C.D., Status of the Redefinition and Readjustment of National Horizontal and Vertical Geodetic Networks and of The National Geodetic Data Base, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Bomford, G., *Geodesy*, quatrième édition, Presses de l'Université Oxford, 1980.

Bomford, G., *Geodesy*, troisième édition, Presses de l'Université Oxford, 1971.

Canadian Petroleum Association, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, 1981.

Essen, L. et Froome, K.D., *The Refractive index of Air for Radio Waves and Microwaves*, Proc. Phys. Soc. B64, London, 1951.

Groten, E., *Geodesy and the Earth's Gravity Field*, vol. 1 et 2, Ferd. Dummlers Verlag, Bonn, 1979.

Heiskanen, W. A. et Moritz, H., *Physical Geodesy*, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1967.

Jones, H.E., Geodetic Datums in Canada, *Le géomètre canadien*, vol. 27, n° 3, 1973.

Krakiwski, E.J., Thomson, D.B., Mathematical Models for the Combination of Terrestrial and Satellite Networks, *Le géomètre canadien*, vol. 28, n° 5, 1974.

Krakiwski, E.J. et Wells, D.E., *Coordinate Systems in Geodesy*, notes de cours n° 16. Département des sciences d'arpentage, Université du Nouveau-Brunswick, Fredericton, 1971.

Krakiwski, E.J., Wells, D.E., et Kirkham, P., Geodetic Control from Doppler Satellite Observations, *Le géomètre canadien*, vol. 26, n° 2, 1972.

Lachapelle, G. et Mainville, A., Least Squares Prediction of Horizontal Coordinate Distortions in Canada, *Actes du symposium international sur les réseaux et les calculs géodésiques*, Munich, 1981.

Lachapelle, G. and Rapp, R.H., Estimation of Disturbing Potential Components with Emphasis on North America, *Actes du Congrès du Centenaire*, Association des sciences géodésiques, Ottawa, 1982.

Lambeck, K., The Relation of Some Geodetic Datums to a Global Geocentric Reference System, *Bulletin géodésique*, n° 99, 1971.

McLellan, C.D., Henderson, J.P. et Boal, J.D., Readjustment of Canadian Secondary Horizontal Control Networks, *Le géomètre canadien*, vol. 32, n° 4, 1978.

McLellan, C.D., Peterson, A.E., et Katinas, G.E., *GALS, Geographic Adjustement by Least Squares*, Levés géodésiques du Canada, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, 1970.

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, *Manuel d'instructions pour l'arpentage des terres du Canada*, Deuxième édition, Ottawa, 1979.

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, *Spécifications pour levés de contrôle et recommandations sur la construction des repères*, SMP-1254F, Ottawa, 1978.

Monteith, W.J. et Gray, D.H., Integration of NAD 83 into the Charting Programs in the United States and Canada, *Lighthouse*, éd. 23, 1983.

Torge, W., *Geodesy, An Introduction*, Walter de Gruyter, New York, 1980.

Vanicek, P. et Krakiwsky, E.J., *Geodesy: The Concepts*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1981.

Bibliographie — Systèmes de positionnement

Adams, J.R., Falkenberg, W.H., Lockhart, J.T. et McGladrey, M., An Overview of Offshore Rig Positioning Procedures in Canadian Waters, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Association canadienne des sciences géodésiques, *Actes du premier symposium international sur la technologie inertielle pour l'arpentage et la géodésie*, Ottawa, 1977.

Association canadienne des sciences géodésiques, *Actes du deuxième symposium international sur la technologie inertielle pour l'arpentage et la géodésie*, Banff, 1981.

Association canadienne des sciences géodésiques, Numéro spécial sur NAVSTAR/GPS, *Le géomètre canadien*, vol. 36, n° 1, 1982.

Association internationale de géodésie, Numéro spécial sur NAVSTAR/GPS, *Bulletin géodésique*, vol. 53, n° 2, 1979.

Babbage, George, Operation of the Inertial Survey System: The Manager's View, *Le géomètre canadien*, vol. 32, n° 3, 1978.

Ball, S.L., Rig Position Fixing, *The Hydrographic Journal*, vol. 1, n° 2, 1973.

Bennett, Colin, Pulse/8 Integrated with Satellite Navigation for Offshore Surveys, *The Hydrographic Journal*, vol. 19, 1980.

Berstis, Kaute A., Development of Field Verification Tests for the ARGO DM-54/Royalist DRS Positioning Systems, *Actes de la 20e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Burlington, 1981.

Bigelow, H.W., Electronic Surveying: Accuracy of Electronic Positioning Systems, *Supplément au International Hydrographic Review*, vol. 6, 1965.

Boal, J.D., *Guidelines and Specification for Satellite Doppler Surveys*, Levés géodésiques du Canada, sous presse, 1983.

Boal, J. David, NAVSTAR/GPS — Present Situation and Future Prospects, *Le géomètre canadien*, vol. 36, n° 1, 1982.

Brunavs, P. et Wells, D.E., *Accurate Phase Lag Measurements over Seawater Using Decca Lambda*, manuscrit non publié, Rapport de l'A.O.L. 1971-2, Bedford Institute, Dartmouth, 1971.

Brunavs, P., Phase Lags over Freshwater Path: Tests in Lake Ontario, *Actes de la douzième conférence canadienne sur l'hydrographie*, Victoria, C.-B., 1973.

Brunavs, P., *Report on Investigation of Effects of Inhomogeneous and Irregular Terrain on the Groundwave Propagation at 100 kHz*, préparé sous contrat, Service hydrographique du Canada, Ottawa, 1976.

Brunavs, P., *Phase Lags of 100 kHz Radio Frequency Groundwave and Approximate Formulas for Computation*, préparé sous contrat, Service hydrographique du Canada, Ottawa, 1977.

Bureau international de l'hydrographie, *Radio Aids to Maritime Navigation and Hydrography*, Numéro spécial n° 39, Monaco, 1965.

Cox, B.G., Island Mapping and Real-Time Surveying Data Base, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff 1981.

Carrière, R.J., Kouba, J., et Penny, R.C., Experience with the Inertial Survey System at the Geodetic Survey of Canada, *Le géomètre canadien*, vol. 32, n° 3, 1978.

Casey, M.J., Range Accuracy and Signal Strength in a Motorola Mini-Ranger System, *Actes de la 20e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Burlington, 1981.

Casey, M.J., Improving the Performance of the Motorola MRS, *Lighthouse*, éd. 24, 1981.

Clegg, Martin L., A Review of the Factors Affecting the Reliable Performance of Underwater Acoustic Positioning Systems, *The Hydrographic Journal*, vol. 18, 1980.

Dathan, Lt. Cmdr., R., Positioning A Pipelaying Ship, *The Hydrographic Journal*, vol. 2, n° 1, 1975.

Defense Mapping Agency, *Actes du 1er symposium géodésique international sur le positionnement par satellite Doppler*, Las Cruces, Nouveau-Mexique, 1976.

Defense Mapping Agency, *Actes du 2e symposium géodésique international sur le positionnement par satellite Doppler*, Austin, Texas, 1979.

Defense Mapping Agency, *Actes du 3e symposium géodésique international sur le positionnement par satellite Doppler*, Las Cruces, Nouveau-Mexique, 1982.

Delorme, P.E., *Sheltech's Integrated Navigation System*, présenté au 4e symposium canadien sur la navigation, Halifax, 1981.

Dixon, Cdr. J.B. et Haugh, A., Positioning the Fourties Field Production Platforms, *The Hydrographic Journal*, vol. 2, n° 4, 1976.

Dumas, L.R. Ribadeau, Barbier, J.M. et Reau, J.P., *Radio Location as Applied to Automated Sounding and Dredging, Experience of Gironde Estuary*, Hydrographic Society Symposium on Position Fixing at Sea, Southampton, Angleterre, 1980.

Eaton, R.M. et Grant, S.T., Rho-Rho Loran-C for Offshore Surveys, *Le géomètre canadien*, vol. 26, n° 2, 1972.

Eaton, R.M., Loran-C Compared with other Navigation Aids in Meeting Future Canadian Needs, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, vol. 21, n° 4, 1975.

Eaton, R.M., Mortimer, A.R. et Gray, D.H., Accurate Chart Latticing for Loran-C, *International Hydrographic Review*, vol. 56, n° 1, 1979.

Eaton, R.M., Range Errors in Microwave Systems, *Lighthouse*, éd. 23, 1981.

Eaton, R.M., Schening, E., et Stuifbergen, N., *A Long Range Performance Test of Loran-C in Atlantic Canada*, Wild Goose Association Convention, Nouvelle-Orléans, 1978.

Eaton, R.M., Wells, D.E. et Stuifbergen, N., Satellite Navigation in Hydrography, *International Hydrographic Review*, vol. 53, n° 1, 1976.

Essen, L. et Froome, K.D., The Refractive Index of Air For Radio Waves and Microwaves, *Actes, Société de physiques*, B64, London, 1951.

Falkenberg, W.H., *"NAVPAK:* An Integrated System for Navigation and Positioning for Offshore Oil and Gas Exploration, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Falkenberg, W.H., Smith, J.W.K., Loran-C as a Navigation Aid for Geophysical Surveys in the Grand Banks, *Actes de la 20e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Burlington, 1981.

Forester, David R., *The Mapping of Sea Surface Conductivity*, Rapport non publié du Service des données marines, ministère de l'Environnement, Ottawa, 1973.

Grant, S.T., Rho-Rho Loran-C Combined with Satellite Navigation for Offshore Surveys, *International Hydrographic Review*, vol. 50, n° 2, 1973.

Grant, S.T., A User Development Integrated Navigation System, *Actes du 15e congrès international des arpenteurs*, Commission 4, Stockholm, 1977.

Gray, David H., Mortimer, Tony, Loran-C Coordinate Converters: Plague or Panacea, *International Hydrographic Review*, vol.59, n° 1, 1982, et les *Actes de la 20e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Burlington, 1981.

Gray, David H., The Preparation of Loran-C Lattices for Canadian Charts, *Symposium de la Société hydrographique sur le positionnement en mer*, Southampton, Angleterre, 1980; et *Le géomètre canadien*, vol. 34, n° 3, 1980.

Gray, David H., Velocity of Decca Frequency Transmissions Over Sea Ice, *Le géomètre canadien*, vol. 29, n° 3, 1975, et *International Hydrographic Review*, vol. 54, n° 1, 1977.

Hagglund, J.E. et Crago, T., Doppler Satellite and Inertial Positioning for the Petroleum Industry, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Hagglund, J.E., Inertial System Application to Offshore Exploration, *Actes du deuxième symposium international sur la technologie inertielle pour l'arpentage et la géodésie*, Association canadienne des sciences géodésiques, Ottawa, 1981.

Hammack, James C., Landsat Goes to Sea, *Lighthouse*, édition 17, 1978.

Haugh, A., Position Fixing Requirements of the Oil Industry, *Symposium de la Société hydrographique sur le positionnement en mer*, Southampton, Angleterre, 1980, et *International Hydrographic Review*, vol.58, n° 1, 1981.

Havland, Martin et Indreeide, Arne, Detailed Sea Bed Mapping for a Pipeline Across the Norwegian Trench, *Actes de la Première conférence technique internationale sur l'hydrographie*, Ottawa, 1979, et *International Hydrographic Review*, vol. 57, n° 2, 1980.

Hill, F.W. et Coons, R.D., ACCUFIX as a Hydrographic Position Fixing System, *Actes de la 19e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Halifax, 1980.

Hittel, A., Kowlsa, J., Integration of Satellite and Decca 12f Survey Systems, *Le géomètre canadien*, vol. 25, n° 4, 1971.

Hotham, L.D. et Strange, W.E., Doppler Satellite Positioning of Offshore Structures, *International Hydrographic Review*, vol. 54, n° 1, 1977.

Hui, Patrick J., On Satellite Signal Processing Techniques Applicable to GPS Geodetic Equipment, *Le géomètre canadien*, vol. 36, n° 1, 1982.

Institute of Navigation, Global Positioning System, Recueil de communications parues dans Navigation, The Institute of Navigation, Washington, 1980.

Jeffery, C.B. et Andrews, A.G., éditeurs, *The Position Finder*, Geospace Engineering Co., Ottawa, 1971.

Jenkins, R.E., et Leroy, C.F., Broadcast versus Precise Ephemeris — Apples and Oranges? *Actes du deuxième symposium géodésique international sur le positionnement par satellite Doppler*, Defense Mapping Agency, Washington, 1979.

Johler, J.R., Kellar, W.J. et Walters, L.C., *Phase of the Low Radio Frequency Ground Wave*, U.S. National Bureau of Standards, circulaire 573, Washington, 1956.

Kirkham, B.P. et Thomson, D.B., *Doppler-Satellite Positioning for Offshore Surveys*, Conférence de l'Association canadienne des sciences géodésiques, Vancouver, 1974.

Kouba, J., Geodetic Satellite Doppler Positioning and Application to Canadian Test Adjustments, *Recueil des travaux*, Levés géodésiques du Canada, 1978.

Lachapelle, G. et Beck, Norman, NAVSTAR/GPS Single Point Positioning at Sheltech Canada – Preliminary Results, *Le géomètre canadien*, vol. 36, n° 1, 1982.

Lachapelle, G. et Kouba, J., Relationship between Terrestrial and Satellite Doppler Systems, *Recueil des travaux*. Levés géodésiques du Canada, Ottawa, 1980.

Lachapelle, G., et Rapp, R.H., Estimation of Disturbing Potential Components with Emphasis on North America, *Actes du congrès du centenaire 1982*, Association canadienne des sciences géodésiques, Ottawa, 1982.

Langhorne, D.N. et Hooper, D.J., An Examination of the Stability of the Port of London Authority Estuary Decca Hi-Fix Chain, *International Hydrographic Review*, vol. 51, n° 2, 1973.

Lelievre, D.D. et Fleming, E.A., The Use of Landsat Imagery to Locate Unchartered Coastal Features, *Actes de la 16e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Burlington, 1977.

Levés géodésiques du Canada, *Recueil des communications*. Publication annuelle préparée par les levés géodésiques du Canada, Ottawa, de 1976 à 1982.

Livingstone, D.B., et Falconer, R.K.H., Skywave LORAN-C Navigation at Sea in the Eastern Arctic, *Actes de la 19e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Halifax, 1980.

Lockhart, J.T., Nickerson, B.G., Smith, J.W.K. et Thomson, D.B., An Argo Based Positioning and Navigation System for the Labrador Coast, *Le géomètre canadien*, vol. 35, n° 1, 1981; et les *Actes de la 19e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Halifax, 1980.

MacDonald, G., *Mini Computer System Used On-Line for Data Processing and Track Control*, Symposium de la Société hydrographique sur le positionnement en mer, Angleterre, 1980.

MacDougall, J.R., Canadian Aerial Hydrography Systems, *Actes de la 20e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Burlington, 1981.

Mackin, N., Schwartz, E. et Gomez, E., Use of Argo Positioning System in Orinoco Delta, Venezuela, *Actes de la Première conférence technique internationale sur l'hydrographie*, Ottawa, 1979.

MacPhee, S.B., Dow, A.J., Anderson, N.M. et Raid, D.B., Aerial Hydrography User Bathymetry and Air Photo Techniques for Obtaining Inshore Hydrography, *The Hydrographic Journal*, vol. 22, 1981.

Martin, Dr. C.F., *The G.P.S. Satellites in the 1980's*, Symposium de la société hydrographique sur le positionnement en mer, Southampton, Angleterre, 1980.

Millington, G., Groundwave Propagation over an Inhomogeneous Smooth Earth, *Actes, Institute of Electrical Engineers*, vol. 96, Part III, 1949.

McKeown, D.L. et Eaton, R.M., An Experiment to Determine the Accuracy of an Acoustic Range-Range Positioning System, *Actes du Symposium international sur l'application de la géodésie marine*, Batelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 1974.

Ministère des Pêches et Océans, *Notes on the Use of Loran-C Charts*, Ottawa, 1980.

Mortimer, A.R., Eaton, R.M. et Gray, D.H., Calibration of the West Canadian Loran-C Chain, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, vol. 24, n° 3, 1978.

Morgan, J.G., The Role of Navigation Satellites in Oil Exploration, *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, vol. 26, n° 1, 1979.

Munson, R. Adm. Robt. C., *Positioning Systems, Report of the Work of WG 146*, Le XVe congrès international des arpenteurs, Stockholm, Suède, 1977.

Norton, J.H. NAVSTAR Global Positioning System, *International Hydrographic Review*, vol. 59, n° 1, 1982.

Powell, C., The Decca Hi-Fix/6 Position Fixing System, *International Hydrographic Review*, vol. 51, n° 1, 1973.

Seeber, Günter, Delf Egge et Hans Werner Schenke, Precise Satellite Doppler Positioning at Sea — Experiences on Stable and Unstable Points, *Marine Geodesy*, vol. 3, 1980.

Seppelin, T.O., The Department of Defense World Geodetic System 1972, *Le géomètre canadien*, vol. 28, n° 5, 1974.

Scott, A.C., MacDonald, B.E., *Determining Downhole Magnetic Interference on Directional Surveys*, SPE 7748, Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Texas, 1979.

Bibliographie — Systèmes de positionnement (suite)

Stansell, T.A., *The Transit Navigation Satellite System-Status, Theory, Performance, Applications*, Document R-5933, Magnavox Government and Industrial Electronics Co., California, 1978.

Stuifbergen, N., Maximum Trails on the Scotian Shelf, *Lighthouse*, éd. 16, 1977.

Stuifbergen, N., SYLEDIS — A New Medium-Range Positioning System, *Lighthouse*, éd. 18, 1978.

Swift, S.G., et Fagan, J., Improved Navigation Reliability Through Kalman Filtering, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Canadian Petroleum Association, Calgary, 1981.

Tripe, R.L.K., NavBox — A Microprocessor-Based Navigation Aid, *Lighthouse*, éd. 17, 1978.

USDOD/DOT, Federal Radionavigation Plan, Vol. I; Radionavigation Plans and Policy, Vol. II; Requirements, Vol. III; Radioavigation System Characteristics and Vol. IV, Radioavigation Research, Engineering and Development, U.S. Department of Defense et U.S. Department of Transportation, (National Technical Information Service Accession Numbers ADA 093774 to ADA 093777).

Van der Ree, A., The ARTEMIS Position Fixing System, *Actes de la 19e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Halifax, 1980.

Van Gein, W.A., Operational Properties and Possibilities of Hi-Fix/6, *The Hydrographic Journal*, vol. 23, 1982.

Volgel, Thomas J., Horizontal Datums for Nautical Charts, *International Hydrographic Review*, vol. 58, n° 2, 1981.

Weightman, J.A., Satellite Geodesy and Offshore Oil, *International Hydrographic Review*, vol. 59, n° 1, 1982.

Wells, D.E., et Grant, S.T., An Adaptable Integrated Navigation System: BIONAV, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Canadian Petroleum Association, Banff, 1981.

Wells, D.E. et Lachapelle, G., Impact of NAVSTAR/GPS on Land and Offshore Positioning in the 1980's, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Wells, D.E., Grant, S. et McKeown, D., Accuracy of the Bedford Institute of Oceanography, Integrated Navigation System (BIONAV), *Actes de la 19e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Halifax, 1980.

Wells, D.E., Grant, S., Reliable Navigation through System Integration, *Actes de la 16e conférence canadienne sur l'hydrographie*, Burlington, 1977.

Wells, D.E., Lachapelle, G. et Grant, S.T., *Enhanced Offshore Positioning Using Current Global Positioning Capabilities*, Présenté à la réunion générale de l'Association internationale de géodésie, Tokyo, 1982.

Wells, D., *A New Integrated Navigation System: BIONAV*, Symposium de la Société hydrographique sur le positionnement en mer, Southampton, Angleterre, 1980.

Wells, D., *Review of Present Day Capabilities of Satellite Systems*, Symposium de la Société hydrographique sur le positionnement en mer, Southampton, Angleterre, 1980, publié dans *The Hydrographic Journal*, vol. 18, 1980.

Wells, D. E., Delikaraoglou, D. et Vanicek, P., Marine Navigation with NAVSTAR/ Global Positioning System (GPS) Today and in the Future, *Le géomètre canadien*, vol. 36, n° 1, 1982.

Wilson, K.S., *Implication to Hydrography of Recent Advances in Inertial Navigation*, Symposium de la Société hydrographique sur le positionnement en mer, Southampton, Angleterre, 1980.

Wilson, P.C., Marine Surveys for Offshore Pipelines — an Appreciation, *Le géomètre canadien*, vol. 27, n° 1, 1973.

Wolf, C.J.M., DeWardt, J.P., *Borehole Position Uncertainty, Analysis of Measuring Methods and Derivation of Systematic Error Model*, SPE 9223, Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Texas, 1980.

Wong, R.V.C., et Schwarz, K-P., Offshore Positioning with an Integrated GPS/Inertial System, *Actes du 3e symposium géodésique international sur le positionnement par satellite Doppler*, Defense Mapping Agency, Washington, 1982.

Bibliographie — Géophysique

Browne, A.R., 3D Seismic Survey Gives Better Data, *Oil & Gas Journal*, n° 5, 1979, p. 57-71.

Dobrin, M.B., *Introduction to Geophysical Prospecting*, 2e éd., McGraw-Hill, New York, 1960.

Grace, Bill et Parlson, Peter, Borehole Surveying Using Canadian MWD Technology, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Johnson, J.P. et Bone, M.R., *Understanding Field Development History Utilizing 3D Seismic*, Conférence sur la technologie au large des côtes, conférence 3849, 473-475, 1980.

MacKinley, H.J. (Juan), Seismic Survey Techniques and Procedures for Petroleum Exploration, *Actes du Colloquium III on Petroleum Mapping and Surveys in the 80's*, Banff, 1981.

Peters, L.J., The Direct Approach to Magnetic Interpretation and Its Practical Application, *Geophysics*, vol. 14, 1949, p. 290-320.

Schneider, W.A., Integral Formulation for Migration in Two and Three Dimensions, *Geophysics*, vol. 43, 1978, p. 49-76.

Selby, E.G., Three-dimensional Data Collection and Processing, *The APEA Journal*, n° 18, 1978, p. 116-123.

Sheriff, R.E., *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

Tegland, E.R., 3D Seismic Techniques Boost Field Development, *Oil & Gas Journal*, Sept. 12, p. 79-82, 1977.

Vacquier, V., Steenland, N.C., Henderson, R.G., et Zeitz, I., *Interpretation of Aeromagnetic Maps*, Mémoire 47 Geological Society of America, 1951.

Admiralty Manual of Hydrographic Surveying, Sounding, The Hydrographer of the Navy, vol. 2, Taunton, Somerset, 1969.

Bureau international de l'hydrographie, *Accuracy Standards*, Numéro spécial n° 44, 1968.

Fédération Internationale des Géomètres, *Report on Detection of Depth Anomalies*, Commission 4, Conference F.I.G., Montreux, 1981.

Ingham, A.E., *Hydrography for the Surveyor and Engineer*, Crosby, Lockwood, Staples, London, 1974.

Lindsay, D.G., *Sea Ice Atlas of Arctic Canada, 1961-1968*, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, 1974.

Lindsay, D.G., *Sea Ice Atlas of Arctic Canada, 1969-1974*, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, 1977.

Lindsay, D.G., *Sea Ice Atlas of Arctic Canada, 1975-1978*, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, 1980.

Markham, W.E., *Ice Atlas, Eastern Canadian Seaboard*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, 1980.

Markham, W.E., *Atlas des glaces, voies d'eau de l'arctique canadien*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, 1981.

Index

A

Accord d'exploration, 17
Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada, 17
Affouillement des glaces, 112
Amplitude des impulsions, erreur, 59
Anomalies éventuelles, champ magnétique, 182
APGTC, Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada, 17
Arctique, règlements sur la navigation dans l', 112
Argo, 67
Arpenteur du Canada, brevet, 25
Artemis, 63
Atelier sur le levé des fonds marins, mandat, 1
Autotape, 63

B

Baie d'Hudson, les glaces, 107
Balise acoustique, 73, 148
Base nationale de données géodésiques, 27
Basses fréquences, système, 68
Boomer, 100
Borne géodésique au large des côtes, 19
Bouée, en tant que repère, 147
Brevet d'arpenteur du Canada, obtention, 25
Brézil, procédure pour les levés de la côte du, 118
Brise-glace, 113
Bruit parasite, erreur, 59

C

Câble sous-marin, 125, 49
Câble sur le plateau continental, 125
Calcul, déplacement de la surface de référence, 33
Canalisation de micro-ondes, 44
Canevas géodésique, 27
  compensation scientifique, 27
Canon à air, 100
Carte, bathymétrique, 145
  cotidale, 85
  marine, 143
Centre radioélectrique, 13
Champ magnétique, anomalies éventuelles, 180
Champ potentiel, méthodes basées sur le, 97
Chenaux, identification des, 58
Chine, procédures pour les levés de la côte de, 118
Claim minier, 19
Clarke, définition de l'ellipsoïde de 1866, 33
Co-relations des mesures, 55
Coefficient de calcul, 46, 47
COGLA, Administration du pétrole et du gaz des terres du Canada, 17
Comité consultatif national des levés de précision, 25
Comité de coordination pour les levés des fonds marins, 1
Compas, pour relevés de sondage, 23
  gyrostatique, 23
Complètement sous-marin, 7
Conductivité de la surface marine, 48
Coordonnée officielle, 25
Cour internationale de Justice, droit de juridiction, 8

D

Danemark-Canada, entente, 25
Decca, 68
Del Norte, transpondeur UHF, 65
Déphasage, primaire, 45, 51
  secondaire, 47, 51
Déplacement local de la surface de référence
  définition, 35, 127
  tableaux, 128
Détroit d'Hudson, les glaces, 107
Dilution géométrique de la position, 56
Discordance dans le système NAD27, 20, 22, 34
Distribution des erreurs (courbe de Gauss), 38
DLS, voir Arpenteur du Canada, 25
Doppler, système par satellite, 38, 57, 71
Droit, de la mer, 8, 123
  pour pipelines, 125

E

Écart type, 38
Écho, impulsions, 78
Échosondeur, 78
Effet hyperbolique du sondage, 81
Ellipse des écarts types, 39
Ellipse d'erreur, 57
Ellipsoïde international, 33, 116
Ellipsoïde pour le NAD83, positionnement, 33
Épaves, en tant que repères, 149
Équation de Laplace, 32
Étallonage, échosondeur, 32
  pour correction de l'erreur zéro, 58
Étendues quadrillées, 19
Étinceleur, 100
Exploration, accord d', 17

F

Facteurs secondaires additionnels, 48
Fidélité, 37
Flexichoc, 100
Forage, technique au large des côtes, 3
  sur plates-formes de glace, 112
Fréquences moyennes, description des systèmes, 66
Frontière, 25, 121
  canado-américaine, 25, 140, 146

G

Gabon, procédure pour les levés de la côte du, 117
Garde côtière canadienne, position sur les aides à la navigation, 121
Gauss, courbe de, 38
GDOP, voir Dilution géométrique de la position, 56
Genève, convention sur le plateau continental, 8
Gestion des levés en mer, 17
Glace de mer, définition, 107
  terminologie, 107
Glace de terre, définition, 107
Glacis continental, définition, 8
GSP/NAVSTAR, Système, 71
Groenland-Canada, ligne de démarcation, 10, 11, 25, 143

H

Hautes fréquence (micro-onde), système de, 63
Hauteur du géoïde, 32, 133
Hauteur géoïdale, définition, 32
Hi-Fix, 53, 67
Hydrophone, 99

I

Iceberg, 110
Îles artificielles sur le plateau continental, 13, 14, 125
Impulsions, écho, 78
    erreur d'amplitude des, 59
Inclinomètres pour relevés de sondage, 23

J

Johler, modèle des déphasages secondaire, 47, 48

L

Labrador, glaces, 107
Laplace, équation de, 82
Levé, gravimétrique, 97
    hydrographique, planification, 77
    magnétométrique, 97
    officiel, 25
    par sismique — réflexion, 98, 103
    par sismique — réfraction, 98
    publication sur les méthodes de, 142
    sismique, 12, 13
Licence d'opérations, 17
Licence de production, 17
Ligne de démarcation Groenland-Canada, 10, 11, 25, 143
Ligne de position, définition, 44
Lignes de base et les eaux intérieures, 26
Limite et repère, 19
Loi sur la production et la conservation du pétrole et du gaz, 17, 18
Loi sur l'arpentage du Canada, 25
Loi sur le pétrole et le gaz du Canada, 17, 18
Loi sur les mers territoriales et les zones de pêche, 26
Loran-C, rho-rho, 53, 61, 68
    exemples de calculs, 53

M

Marée, dans les eaux canadiennes, 86, 89
    et niveau d'eau, 82
Marge continentale du Canada, 8, 10
Maxiran, 65
Meades Ranch, point initial du NAD27, 34
Mer du Nord, procédure pour les levés, 116
Mer territoriale, 26
Micro-ondes, description des systèmes des, 63
Milieu marin — service des données, 48
Millington, déphasages secondaires de la méthode de, 50
Minéral, autre que le pétrole et le gaz, 17
Mini-Fix, 67
Mini-Ranger, 63
Mode de fonctionnement, distance-distance, description, 41
    rho-rho, description, 41
Mode hyperbolique, définition, 44

N

NAD27, définition, 22, 34
NAD83, définition, 22
    positionnement de l'ellipsoïde pour le, 33
    projet de compensation, 34
National Petroleum Council, projections des ressources mondiales, 3
Nations Unies et les droits du Canada, 8, 10, 123
Navigation par satellite Doppler, précision, 58
NAVSAT, définition, 38
NAVSTAR/GPS, système, 71
NNSS, voir United States Navy Navigational Satellite System, 38, 57, 71

O

Omega, 70
Onde ionosphérique, 44, 59

P

Permis d'exploitation, pétrole et gaz, 11, 17, 140, 141
Perse, procédures de levés au Golfe de, 117
Pipeline, lignes directices concernant les relevés de, 153
    positionnement, sous-marins, 13
    sur le plateau continental, 128
Plan de référence, 83
    sondage, 85
Plan sondage provisoire, critères, 12
Plateau continental, câbles et pipe-lines, 128
    définition, 8, 124
Positionnement, au large des côtes, 37, 41
    des puits d'exploration, rapports, 25, 135
    par radio, classification, 41
    système acoustique, 73
    système inertiel, 72
    zones de — au large des côtes, 37
Précision, courbes, 56
    de la position, 38, 41, 53
    de positionnement d'un système de navigation à deux distances, 38
    des mesures, 37, 61, 63, 65, 66, 68
    et, fidélité, 37
    spécifications relative à la, 27, 29
Probabilité de l'ellipse des écarts types, 39
Propagation, des ondes radio-électriques, 44
    vitesse, 59
Publication, sur la monenclature des glaces, 144
    sur les aides à la navigation, 144
    sur les levés des terres sous-marines, 142
    sur les marées, 144
Puits, d'exploration, 12, 25
    de délimitation, 13
    détermination de la position des, 22, 25, 135
    en tant que repères, 149

Q

Quadrillage de délimitation, 19

R

Raydist, 67
Réalisation de systèmes de références, 32
Rebord du plateau, 10
Reconnaissance pour le forage, 12
Réflecteur acoustique en tant que repère, 180
Règlement, applicable aux levés des terres sous-marines, 135
  concernant le forage des puits de pétrole et de gaz au Canada, 17, 18
  sur l'exploitation minière au Canada, 17, 19
  sur les oléoducs et les gazoducs du Canada, 17
  sur les terres pétrolifères et gazifères du Canada, 17
Règle à l'extérieur de l'Amérique du Nord pour définir des positions, 115
Relevés de sondage, 23
Repères et complétions sous-marines, 24
Repères et points de références, 20

S

Satnav, 38, 57, 71
Shoran, XR, 65
Sonar-Doppler, système de navigation, 74
Sonar, latéral, 100
Sondage, 82
Spécifications relatives aux rapports de positionnement, 135
St-Pierre et Miquelon, droits minéraux, 25
Stabilité des fréquences, erreur, 59
Station côtière, 27
Submersible, 8
Surface de référence, déplacement local, 35
  nord-américaine de 1927, 33, 34
  transformation, 33
  verticale, 31
Syledis, 65
Système, astronomique, 31, 73
  de positionnement, 22
  intégré, 73
  micro-onde description, 63
  par satellite Doppler, 38, 57, 71
  photogrammétrique, 73
  terrestre classique, 31
  Transit, voir NNSS, 38, 57, 71
Système de navigation, distance-distance, 38
  hyperbolique, définition, 38
  logistique, 60
  par satellite Doppler, 38, 57, 71
  public, 60
  rho-rho, définition, 38
  Sonar-Doppler, 74
Systèmes de références, astronomiques, 31
  ellipsoïdaux, 31
  géodésiques, 31
  verticale, 31

T

Talus continental, définition, 8, 10, 124
TBF, description des systèmes, 70
Technique de forage au nord des côtes, 3
Telluromètre MR01, 63
Toran, 67
Tour, en tant que repères, 147
Traitement des données, 59
Trajectoire terrestre au-dessus des glaces de la mer, 50
Transducteur, 79
  largeur du faisceau du, 79
Transit, système, voir NNSS 88, 57, 71
Transmission, en temps partagé, 44
  par impulsions, 44
  par onde continue, 44
Transpondeur, acoustique, 148
  UHF Del Norte, 65
Très basses fréquences, description des systèmes, 70
Trisponder, 63
Tunis, procédures pour les levés de la côte de, 117

U

UHF, description des systèmes, 65
Union internationale de géodésie et de géophysique, 33
United Kingdom Offshore Operators Association, 116
United States Navy Navigational Satellite System (NNSS), 38, 57, 71

V

Vitesse du son, 79

W

Weir, C.H., rapport sur les compétences des arpenteurs du Canada, 25

X

XR Shoran, 65

Z

Zone, au-delà de l'horizon, 37
  de couverture des visées optiques, définition, 37
  de positionnement au large des côtes, 37
  éloignée, définition, 37